

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО  
ГОСПОДАРСТВА**

**Б. С. Ільченко**

**ДІАГНОСТУВАННЯ  
ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ**

**МОНОГРАФІЯ**

**Харків**

**ХНАМГ**

**2011**

УДК 621.6.02.001.5  
ББК 39.76-08 и  
I45

Рецензенти:

*О. Л. Шубенко* д-р техн. наук, проф., член-кор. НАН України,  
*В. А. Маляренко* д-р техн. наук, проф., Засл. діяч науки і техніки України.

*Затверджено Вченою радою Харківської національної академії міського  
господарства, протокол № 11 від 24 червня 2011 р.*

**Ільченко Б. С.** Діагностування функціонально-технічного стану  
I45 газоперекачувальних агрегатів: монографія / Б. С. Ільченко; Харк.  
нац. акад. міськ. госп-ва. - Х.: ХНАМГ, 2011. – 228 с.

ISBN 978-966-695-201-4

Приведені методи діагностування показників і характеристик фактичного функціонально-технічного стану відцентрових нагнітачів (ВЦН) і газотурбінних установок (ГТУ) парку газоперекачувальних агрегатів (ГПА) газотранспортної системи. Науково обґрунтовані оцінки фактичного функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів і методи їх визначення на основі газодинамічної моделі і узагальненого нормованого дефекту проточної частини відцентрових нагнітачів і газотурбінних установок. Отримані й експериментально підтверджені фактичні характеристики функціонально-технічного стану парку відцентрових нагнітачів магістральних газопроводів України.

Для наукових та інженерно-технічних фахівців з експлуатування газотранспортних систем, студентів і аспірантів енергетичних спеціальностей.

УДК 621.6.02.001.5  
ББК 39.76-08 и

ISBN 978-966-695-201-4

© Б. С. Ільченко  
© ХНАМХ, 2011

## ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕДМОВА .....	4
ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ І СКОРОЧЕННЯ .....	6
ВСТУП .....	9
1. ДІАГНОСТИЧНІ МЕТОДИ Й ДІАГНОСТОВАНІ ОЦІНКИ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ .....	12
1.1. Оцінка функціонально-технічного стану відцентрових нагнітачів (ВЦН) і газотурбінних установок (ГТУ) .....	12
1.2. Принципи розробки діагностичних методів .....	15
1.3. Исходні (паспортні) характеристики відцентрових нагнітачів .....	33
2. ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ НА ОСНОВІ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ .....	44
2.1. Знос проточної частини відцентрового нагнітача в процесі експлуатації .....	44
2.2. Метод діагностування функціонально-технічного стану відцентрового нагнітача на основі газодинамічного розрахунку проточної частини .....	46
2.3. Вплив зносу проточної частини відцентрового нагнітача на його функціонально-технічний стан .....	68
3. ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ ЗА ДАНИМИ ШТАТНИХ ВИМІРЮВАНЬ .....	89
3.1. Узагальнений нормований дефект проточної частини відцентрових нагнітачів. ....	91
3.2. Метод діагностування функціонально-технічного стану відцентрових нагнітачів на основі визначення узагальненого нормованого дефекту .....	96
3.2.1. Метод діагностування функціонально-технічного стану відцентрових нагнітачів за одиничним вектором штатних вимірювань і за серією вимірювань .....	101
3.2.2. Метод діагностування функціонально-технічного стану відцентрових нагнітачів при неповноті штатних вимірювань .....	109
3.2.3. Оцінка вірогідності результатів діагностування .....	122
4. ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ .....	128
4.1. Оцінка функціонально-технічного стану газотурбінних установок на основі узагальнених нормованих дефектів .....	128
4.2. Дослідження вірогідності методу визначення функціонально-технічного стану газотурбінних установок .....	139
4.3. Результати оцінки точності визначення функціонально-технічного стану газотурбінних установок за допомогою повузлової моделі .....	157
5. МОНІТОРИНГ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ ....	166
5.1. Завдання моніторингу функціонально-технічного стану ГПА системи магістральних газопроводів України .....	166
5.2. Моніторинг функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів на рівні компресорної станції .....	168
5.3. Моніторинг функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів на рівні управління магістральними газопроводами і ДК «Укртрансгаз» .....	181
ЛІТЕРАТУРА .....	208
ДОДАТОК .....	214

## ПЕРЕДМОВА

В умовах старіння і зносу устаткування газотранспортної системи України одним із шляхів підвищення економічності й надійності транспортування природного газу при обмеженості інвестицій є перехід від традиційної системи експлуатації на нову ресурсозберігаючу експлуатацію за "фактичним станом". Можливість такого переходу, в першу чергу, спирається на ефективні методи математичного моделювання процесів зносу деталей і елементів відцентрових нагнітачів і газотурбінних установок газоперекачувальних агрегатів для визначення діагностичних характеристик і параметрів їх фактичного функціонально-технічного стану за даними штатних засобів вимірів. При цьому для вивирішення завдань оптимізації режимів роботи газотранспортної системи, порівняльної оцінки і контролю ефективності роботи устаткування, визначення черговості реновації, ремонтно-технічного обслуговування, нормування витрат газу на власні потреби необхідні діагностичні характеристики, що визначаються для всього парку встановленого устаткування на один і той же або близькі моменти часу.

З позиції такого підходу в монографії сформульована і науково обґрунтована система оцінок функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів, що визначається за даними штатної експлуатації; сформульовані системні принципи синтезу методів визначення функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів, що поєднують необхідну сукупність методів і моделей в єдину методологію. На основі розроблених методів оцінок функціонально-технічного стану відцентрових нагнітачів і газотурбінних установок на різних рівнях керування газотранспортною системою за інформацією штатних агрегатних і цехових вимірів забезпечується необхідна для вивирішення технологічних задач вірогідність і точність оцінок. Удосконалено методи визначення коефіцієнтів технічного стану відцентрових нагнітачів і газотурбінних установок у функції режимів роботи газоперекачуючих агрегатів. Розраховано й експериментально підтверджено по окремих типах

відцентрових нагнітачів характеристики функціонально-технічного стану усього парку відцентрових нагнітачів газоперекачувальних агрегатів газотранспортної системи України. Удосконалено методи визначення оптимальної завантаженості газоперекачувальних агрегатів в компресорному цеху і обґрунтовано критерій ефективної завантаженості газоперекачувальних агрегатів, що мають різний функціонально-технічний стан. Дана книга є переробленим і доповненим виданням монографії Б. С. Ильченко и Б. И. Измаков «Теоретические основы и методы расчета функционально-технического состояния газоперекачивающих агрегатов».

## ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ, СИМВОЛИ, СКОРОЧЕННЯ І ТЕРМІНИ

### Скорочення, що використані в тексті:

АСУ ТП	– автоматизована система управління технологічним процесом;
БД	– база даних;
ГВС	– газовимірювальна станція;
ГПА	– газоперекачувальний агрегат;
ГТС	– газотранспортна система;
ГТУ	– газотурбінна установка;
ГТД	– газотурбінний двигун;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
КС	– компресорна станція;
КТС	– коефіцієнт технічного стану;
КЦ	– компресорний цех;
ЛВУ	– лінійно-виробниче управління;
ОК	– осьовий компресор;
САУ	– система автоматизованого управління;
СТ	– силова турбіна;
ТВТ	– турбіна високого тиску;
ТНТ	– турбіна низького тиску;
УМГ	– управління магістральним газопроводом;
ФТС	– функціонально-технічний стан;
ЦБН	– відцентровий нагнітач.

### Умовні позначення параметрів

$\Delta$	– абсолютна зміна параметру;	
$\varepsilon$	– міра стиснення;	
$\varepsilon_{пр}$	– приведена міра стиснення;	
$\eta_{пол}$	– політропний ККД ВЦН;	
$\eta_e$	– ефективний ККД ГТУ;	
$\pi$	– приведений тиск;	
$\pi_k$	– ступінь стиснення в компресорі;	
$\pi_T$	– ступінь розширення в турбіні;	
$\rho$	– густина газу;	$кг/м^3$ ;
$\tau$	– приведена температура;	
$C_{p0}$	– питома теплоємність ідеального газу;	$Дж/кг \cdot K$ ;

$C_p$	– питома теплоємність газу при постійному тиску;	$\text{Дж/кг} \cdot \text{К};$
$\Delta C_p$	– поправка для визначення теплоємності,	$\text{Дж/кг} \cdot \text{К};$
$D(x)$	– дисперсія;	
$d$	– відношення густини газу до густини повітря;	
$G_{сек}$	– секундна масова витрата газу через нагнітач;	$\text{кг/с};$
$G_{тг}, G_t$	– масова витрата паливного газу;	$\text{кг/с};$
$H_n$	– питома політропна робота (політропний напір),	$\text{Дж/кг};$
$H_u$	– внутрішня питома робота (повний напір),	$\text{Дж/кг};$
$i$	– питома ентальпія газу;	$\text{кДж/кг};$
$i_t$	– питома ентальпія паливного газу;	$\text{кДж/кг};$
$K$	– коефіцієнт технічного стану;	
$M$	– молярна маса природного газу,	$\text{кг/кмоль};$
$M(x)$	– математичне очікування;	
$MC_{p0}$	– мольна теплоємність ідеального газу,	$\text{Дж/кмоль} \cdot \text{К};$
$m_T$	– температурний показник політропи;	
$m_v$	– об'ємний показник політропи;	
$n$	– частота обертання ротора ВЦН,	$\text{об/хв.};$
$n_{квд}$	– частота обертання ротора КВТ,	$\text{об/хв.};$
$n_{кнд}$	– частота обертання ротора КНТ,	$\text{об/хв.};$
$n_{ст}$	– частота обертання ротора СТ,	$\text{об/хв.};$
$n_n$	– номінальна частота обертання ротора ВЦН,	$\text{об/хв.};$
$N_e$	– ефективна потужність ГТУ (потужність на муфті "ГТУ – нагнітач"),	$\text{кВт};$
$N_u$	– внутрішня потужність ВЦН,	$\text{кВт};$
$\Delta N_m$	– механічні втрати потужності у ВЦН,	$\text{кВт};$
$\left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np}$	– приведена частота обертання ротора ВЦН;	
$\left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np}$	– приведена відносна внутрішня потужність ВЦН,	$\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг};$
$P_a$	– атмосферний тиск повітря,	$\text{кгс/см}^2;$
$P_{ан}$	– атмосферний тиск повітря при визначенні номінальної потужності ГТУ (ГОСТ 28775),	$\text{кгс/см}^2;$
$P_{вх}$	– надлишковий тиск газу на вході нагнітача,	$\text{кгс/см}^2;$

$P_{вих}$	– надлишковий тиск газу на виході нагнітача,	
$P_{кр}$	– критичичний тиск,	$кгс/см^2$ ;
$P_{st}$	– тиск, при якому визначається густина газу,	$кгс/см^2$ ;
$S$	– ентропія,	$кДж/кг \cdot K$ ;
$Q$	– об'ємна продуктивність ВЦН;	$м^3/мин$ ;
$Q_{ком}$	– комерційна продуктивність ВЦН,	$млн.м^3/сут$ ;
$Q_{пр}$	– приведена об'ємна продуктивність ВЦН,	$м^3/мин$ ;
$Q_p^H$	– масова нижча теплота згоряння газу,	$кДж/кг$ ;
$T_{вх}$	– температура газу на вході ВЦН,	$K$ ;
$t_{вх}$	– температура газу на вході ВЦН,	$^{\circ}C$ ;
$T_{вих}$	– температура газу на виході ВЦН,	$K$ ;
$t_{вих}$	– температура газу на виході ВЦН,	$^{\circ}C$ ;
$T_{кр}$	– критична температура газу,	$K$ ;
$[T_H]_{пр}$	– приведена температура газу на вході ВЦН,	$K$ ;
$T_{st}$	– температура газу, при якій визначається густина газу,	$K$ ;
$R$	– газова постійна;	$кДж/кг \cdot K$ ;
$V$	– коефіцієнт ізобарного стиснення газу;	
$X$	– вектор вимірювань параметрів ВЦН;	
$X^r$	– розрахунковий вектор стану ВЦН;	
$Y$	– коефіцієнт ізотермічного стиснення газу;	
$Z$	– коефіцієнт стиснення газу;	
$Z_{пр}$	– приведений коефіцієнт стиснення газу на вході ВЦН.	

Решта позначень наведені в тексті.



## ВСТУП

Ефективне керування газотранспортною системою (ГТС), що містить сотні газоперекачуючих агрегатів (ГПА) різних типів з різним терміном наробітку і розподілених на великій території, неможливо без об'єктивної інформації про фактичний функціонально-технічний стан (ФТС) усіх експлуатованих агрегатів. Фактичний ФТС ГПА характеризується на визначений момент часу значеннями функціональних характеристик і параметрів, номенклатура яких оговорена технічною документацією на ГПА і його елементи. Інформація про ФТС ГПА необхідна для вивирішення наступних технологічних задач керування газотранспортною системою, що дозволяють вирішити ряд питань енергозбереження процесу транспорту газу [36, 38, 55]:

- оптимізації режимів роботи ГПА у складі компресорного цеху (КЦ), магістрального газопроводу і газотранспортної системи в цілому на основі фактичних характеристик відцентрових нагнітачів (ЦБН) і газотурбінних установок (ГТУ);
- визначення областей припустимих режимів роботи ГПА;
- розрахунку і планування режимів роботи окремого КЦ, усіх КЦ магістрального газопроводу і газотранспортної системи в цілому;
- реалізації ресурсосберегаючого технічного обслуговування ГПА відповідно до фактичного ФТС ЦБН і ГТУ;
- розрахунку ресурсу, надійності роботи устаткування, зменшення імовірності раптових відмовлень з метою підвищення безпеки експлуатації ГПА;
- оцінки ефективності виконаних ремонтів і технічного обслуговування ГПА;
- обліку і продовження наявного ресурсу газоперекачувального устаткування;
- визначення оптимальних термінів реновації ГПА газотранспортної системи;
- контролю й аналізу ефективності експлуатації ГПА для якісного

вирішення задач енергозбереження;

- моніторингу ФТС ЦБН і ГТУ в складі компресорної станції (КС) і керування магістральними газопроводами (УМГ).

Виішення перерахованих завдань керування ГТС за паспортними характеристиках ГПА приводить до істотного збільшення енерговитрат на транспорт газу і витрат на технічне обслуговування енергоустаткування ГТС. Так, за даними ВАТ "Газпром", виконання технічного обслуговування і виведення в ремонт енергоустаткування в терміни (індивідуальні для кожної одиниці) відповідно до фактичного технічного стану зменшує витрати на технічне обслуговування на 40 % і збільшує ресурс у середньому на 30 %.

У даний час розробленої великий спектр методів і моделей параметричної діагностики ВЦН і ГТУ, але разом з тим єдиний цілісний підхід до вивірення завдання оцінки фактичного ФТС ГПА на основі цих методів створений не був.

До основних проблем вирішення задачі оцінки фактичних ФТС ЦБН і ГТУ слід віднести:

- обмежену й різну від типу до типу ГПА номенклатуру вимірюваних параметрів ГТУ і ВЦН;
- великі похибки і недостатня кількість штатних каналів виміру параметрів ГПА;
- відсутність у структурах ГТС для більшості типів ВЦН і ГТУ вихідних конструкторських даних по проточних частинах і газодинамічних характеристиках окремих агрегатів;
- складність математичного опису газодинамічних процесів, що протікають у ГТУ і ВЦН;
- відсутність сучасної методичної бази проведення теплотехнічних і газодинамічних випробувань ГТУ і ВЦН.

Тому особливого значення набувають розробка і впровадження сучасних методів діагностування, здатних забезпечити об'єктивну оцінку фактичного

ФТС усього парку експлуатованих ГПА. На основі даних про фактичний ФТС ГПА реалізується можливість їх подальшої ефективної експлуатації за рахунок переходу від традиційного планово-профілактичного технічного обслуговування до ресурсозберегаючого. Такий підхід істотно знизить витрати на підтримку ГПА у працездатному стані за рахунок об'єктивної інформації для формування планів ремонтів і реновації устаткування компресорних станцій (КС) газотранспортної системи України, дозволить оптимізувати технологічні процеси і підвищити надійність транспортування газу.

У даній роботі представлені методологія і її теоретичне обґрунтування визначення показників і характеристик фактичного ФТС ГПА на різних рівнях керування експлуатацією ГТС за даними штатних вимірів. Представлені також результати використання розроблених методів і моделей на об'єктах керування ГТС України. Вирішено ряд технологічних задач підвищення ефективності експлуатації газоперекачувального устаткування на основі фактичних характеристик ВЦН і ГТУ.

# **1. ДІАГНОСТИЧНІ МЕТОДИ Й ДІАГНОСТОВАНІ ОЦІНКИ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ**

## **1.1. ОЦІНКА ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ (ВЦН) І ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК (ГТУ)**

Завдання вибору оцінок ФТС ГТУ і ВЦН розглядається в наступній постановці: необхідно визначити за даними штатних приладів агрегатної і цехової автоматики, даними теплотехнічних випробувань одну або кілька сукупних параметрів і характеристик, що незалежно від типу агрегату, однозначно і з максимальною вірогідністю характеризують фактичне ФТС ВЦН і ГТУ. При цьому оцінки ФТС ВЦН і ГТУ повинні задовольняти наступним умовам:

- оцінки повинні містити достатню за складом і точністю інформацію для вирішення всіх технологічних завдань керування експлуатацією (керування ГПА, КС, газопроводом і в цілому ГТС, технічне обслуговування ГПА і т.д.);
- оцінки ФТС не повинні викликати утруднень для їхнього використання. З аналізу найбільш відомих методів діагностики ГПА випливає, що результатами діагностики є:
- різні КТС ВЦН, ГТУ і ГПА в цілому [19, 42];
- фактичні зведені характеристики ВЦН і ГТУ [42];
- величини конкретних дефектів проточних частин ВЦН і ГТУ [47].

КТС, що представляються у виді скалярних величин, зручні для використання і дозволяють вирішувати всі технологічні задачі керування експлуатацією. У той же час, вірогідність цих коефіцієнтів низька.

В основному КТС визначають при проведенні теплотехнічних випробувань ВЦН на КС. Як правило, ці випробування проводять з

використанням штатних приладів агрегатної автоматики. Кількість вимірів параметрів ГПА не перевищує трьох. Зведена об'ємна продуктивність ВЦН від виміру до виміру змінюється в межах  $2 \div 3 \%$ , а частота обертання турбін - на 100 про/хв. КТС, що розраховуються постійні для всього діапазону приведеної продуктивності ВЦН і, по суті, виступають як усереднені показники зсуву (прямого зрушення) фактичних характеристик щодо паспортних.

Інформація, що утримується у фактичних зведених характеристиках ВЦН і ГТУ, достатня для вирішення технологічних завдань керування транспортом газу. Оскільки ці характеристики є функціями від одного і більше приведених параметрів, їхнє використання в ряді випадків викликає певне утруднення. Вірогідність зведених характеристик багато в чому визначається точністю обчислення об'ємної продуктивності ВЦН. Розрахунок об'ємної продуктивності ВЦН за інформацією датчика перепаду тиску газу на звужуючому пристрої нагнітача зв'язаний з похибкою в десятки відсотків.

Вірогідність конкретних дефектів проточних частин, що розраховуються, ВЦН і ГТУ визначається в основному методичними похибками використовуваних математичних моделей ГТУ і ВЦН і інструментальними погрешностями виміру параметрів ГПА. При визначенні ФТС ГПА в умовах КС і вимірі параметрів штатними приладами, інструментальні похибки настільки великі, що методи параметричної діагностики не забезпечують поділення дефектів. До того ж багато методів параметричної діагностики не пристосовані до умов, коли число "підозрюваних" у наявності дефектів проточних частин ГТУ і ВЦН більше числа вимірюваних параметрів, а ті методи, що враховують ці умови, не забезпечують обґрунтування одиничності одержуваних рішень і оцінок вірогідності результатів. У тих випадках, коли конкретні дефекти проточних частин ВЦН і ГТУ можна визначити з необхідною вірогідністю, інформація, що міститься в них, достатня для вирішення технологічних задач керування експлуатацією. При цьому необхідно вирішити завдання визначення

фактичних зведених характеристик ВЦН і ГТУ в області можливої зміни зведених параметрів.

Підводячи підсумок аналізу можливого вибору в якості оцінки ФТС відомих діагностичних параметрів, слід зазначити:

- взаємозалежна задача вибору діагностуємих параметрів і характеристик ГПА в умовах КС, їхнього визначення з точністю в кілька відсотків щодо паспортних значень не вирішена;
- фактичні приведені характеристики ВЦН і ГТУ стосовно КТС мають більшу вірогідність і не пред'являють таких твердих вимог до точності виміру параметрів ГПА, що необхідні для визначення конкретних значень дефектів.

Пропонується ввести поняття сукупності узагальнених дефектів проточної частини ВЦН і ГТУ, установити однозначну відповідність між значенням кожного виду узагальненого дефекту з цієї сукупності і положенням розрахункових приведених характеристик ВЦН і ГТУ щодо паспортних.

Під узагальненим нормованим дефектом проточної частини розуміється вид і значення функції зсувів фактичних зведених характеристик щодо паспортних, які відображують сукупний вплив на цей зсув різних видів конкретних дефектів проточних частин або їхніх комбінацій (зазор в ущільненні покривного диска, підріз лопаток робочого колеса і лопаткового дифузора і т.п.).

Безпосередньо види узагальнених дефектів і параметри зсуву розрахункових характеристик визначають на основі експериментальних і теоретичних досліджень впливу найбільш ймовірних (основних) дефектів проточної частини ВЦН і їхніх комбінацій на характеристики кожного конкретного ВЦН [6, 12].

Як оцінку функціонально-технічного стану ВЦН вибирають:

- величину і вид узагальненого дефекту ВЦН,  $D_c = \{D_j\}$ , де  $ND$  - число введених узагальнених дефектів проточної частини ВЦН;
- фактичні зведені характеристики ВЦН, положення яких щодо паспортних

однозначно визначається  $D_c$ ;

- коефіцієнт технічного стану (КТС) ВЦН.

Як оцінку ФТС ГТУ вибирають [29]:

- а) вид і величину узагальненого нормованого дефекту ГТУ

$$Y_c \in \{Y_j\} \quad j = \overline{1, NS};$$

- б) фактичні зведені характеристики ГТУ, положення яких щодо паспортних однозначно визначається  $Y_c$ ;

- в) КТС на номінальному режимі роботи ГТУ, зведені до станційних умов.

## **1.2. ПРИНЦИПИ РОЗРОБКИ ДІАГНОСТИЧНИХ МЕТОДІВ**

Розробка необхідної сукупності методів і моделей оцінки ФТС ГПА на різних рівнях керування ГТС є складною і трудомісткою задачею. Для її успішного рішення необхідні визначені методичні підходи.

Пропонований синтез методів і моделей оцінки ФТС ГПА на основі загальносистемних принципів полягає у виконанні наступної послідовності операцій:

- формування обмеженої кількості варіантів постановок задач на розробку методів і моделей;
- попередній аналіз варіантів і попередня оцінка значень критеріїв ефективності за умови реалізації вимог і обмежень на їхню розробку;
- вибір одного або декількох варіантів ефективних методів і моделей оцінки ФТС для кожного рівня керування ГТС, їхня детальна розробка і створення на їхній основі алгоритмів і програм для оцінки ФТС ГПА;
- експериментальна апробація розроблених методів і моделей за реальною інформацією, зіставлення отриманих методів і моделей оцінки ФТС із реальною інформацією про стан ГПА, вибір оптимальних налаштувань алгоритмів;
- верифікація методів і моделей за результатами експериментальних

досліджень.

Необхідність використання загальних системних принципів синтезу методів і моделей оцінки фактичного ФТС ГПА пов'язана з наступними факторами й умовами:

- кількісними і якісними характеристиками енергоустаткування газо-транспортної системи - сотні різнотипних ГПА з різним терміном наробітку, з різною номенклатурою і точністю вимірюваних параметрів;
- багаторівневою системою управління транспортовкою газу і необхідністю координації оцінки ФТС ГПА як всередині рівней управління, так і між рівнями;
- концептуальним рішенням проблемних питань досягнення необхідних показників вірогідності оцінки ФТС ГПА як усередині рівнів керування, так і між рівнями;
- єдиним підходом до оцінки ефективності синтезованих методів і моделей оцінки ФТС ГПА.

Системні принципи разом з прийнятими розрахунковими умовами регламентують реалізацію необхідної сукупності взаємно скоординованих методів і моделей у вигляді єдиної методології [14, 28, 43]. Регламентація розробок реалізується на рівні вимог, обмежень і критеріїв синтезу кожного методу і кожної моделі.

У якості системних принципів синтезу в даній роботі пропонується використання принципів [23, 25]:

- єдності;
- цілісності;
- ефективності.

### **Принцип єдності**

Реалізація принципу єдності забезпечує уніфікацію і універсалізацію розроблюваних методів і моделей оцінки ФТС ГПА.



У сфері уніфікації вирішують наступні завдання:

- приведення паспортних характеристик ВЦН і ГТУ всіх ГПА, експлуатованих до відповідних єдиних умов їхнього визначення;
- вибір єдиного комплексу характеристик і показників ФТС ВЦН і ГТУ для різних типів ГПА;
- розрахунок характеристик і показників ФТС на всіх етапах життєвого циклу ВЦН і ГТУ (від моменту виготовлення до ухвалення рішення про зняття з експлуатації) відповідно до єдиних стандартів і/або методичними вказівками;
- оцінка вірогідності вхідної вимірюваної інформації і якості результатів обчислення характеристик і показників ФТС ВЦН і ГТУ на основі єдиних критеріїв;
- реалізація єдиних показників ефективності методів і моделей оцінки ФТС загальних для всіх типів ГПА (у рамках розробляємої методології).

Універсалізація методів і моделей повинна забезпечувати визначення ФТС всіх ГТУ і ВЦН ГПА, що експлуатуються в газотранспортній мережі України.

### **Принцип цілостності**

Принцип цілісності полягає в забезпеченні повноти й несуперечності розробки методології, координації методів і моделей з метою підвищення їхньої ефективності.

Щодо повноти і несуперечності, то даний принцип означає необхідність реалізації в методології наступних розробок:

- детермінованих, вірогідносних і комбінованих методів оцінки ФТС ВЦН і ГТУ на всіх рівнях керування ГТС, заснованих на теоретичних і експериментальних дослідженнях впливу різних видів дефектів проточних частин на ФТС ГПА;
- різного рівня складності газодинамічних моделей проточних частин ГТУ і ВЦН. Рівень складності математичних моделей конкретних типів ВЦН і

ГТУ визначається наявністю вихідних даних по конструкції проточних частин ГТУ і ВЦН, характеристиками окремих агрегатів і вузлів;

- математичного забезпечення, налаштування і верифікації методів оцінки ФТС і математичних моделей ГТУ і ВЦН за результатами усіх видів експериментальних іспитів ГПА.

У частині координації методів і моделей оцінки ФТС даний принцип визначає необхідність вирішення наступних завдань:

- обмін вхідної інформації і результатів обчислень між рівнями;
- зіставлення отриманих результатів на різних рівнях;
- оцінка точності одержуваних результатів і усунення причин неприпустимих відхилень між одержуваними результатами;
- оцінка вірогідності ФТС, що визначаються за діагностичними результатами, отриманими на різних рівнях керування ГТС

### **Принцип ефективності**

Принцип ефективності методів параметричної діагностики ВЦН і ГТУ, до яких відносяться і синтезовані методи оцінки ФТС ГПА, у загальному випадку визначається наступними критеріями:

- вірогідністю, як мірою об'єктивної оцінки відповідності ФТС ГПА дійсному технічному станові ГПА;
- точністю оцінки, що характеризує ступінь відповідності дійсному й отриманих у результаті випробувань характеристик і параметрів, що визначають ФТС ГПА;
- оперативністю (часом оцінки ФТС ГПА);
- практичною затребуваністю (цінністю) результатів оцінки при використанні їх у конкретних технологічних процесах транспортування газу й обслуговуванні енергоустаткування ГТС.

Приведені критерії є взаємозалежними. Наприклад, при інших однакових умовах величина швидкодії буде тим менше, чим вище вимоги по вірогідності цієї оцінки.

Слід також зазначити, що безпосереднє одержання прийнятних значень вірогідності не завжди можливо в умовах неповноти й невірогідності вхідної

вимірюваної інформації. Тому необхідно ввести в розробку методології принцип ефективності як сукупність методичних розробок і організаційних рішень, спрямованих на одержання достатньої для вирішення технологічних завдань вірогідності оцінки ФТС ГПА.

Принцип ефективності визначає досягнення необхідного значення вірогідності оцінки ФТС ГПА як результату послідовних дій:

- а) оцінка ФТС ГПА на основі обробки первісної сукупності векторів вимірів параметрів ГПА за допомогою синтезованих методів і моделей виходячи з критерію максимуму вірогідності при завданні значень за іншими критеріями ефективності як обмеження;
- б) оцінка значення вірогідності й аналіз достатності отриманої оцінки для вирішення технологічних завдань управління ГТС;
- в) у разі неприйнятності оцінки вірогідності визначення переліку необхідних організаційних заходів щодо одержання додаткової інформації або підвищенню точності виміру параметрів ГПА для наступного циклу іспитів (проведення калібрувань датчиків, заміна датчиків на більш точні, використання інформації із сусідніх, працюючих у КЦ ГПА і т.д.);
- г) проведення наступного циклу випробувань з визначенням оцінки ФТС ГПА;
- д) повторна оцінка значення вірогідності й аналіз достатності отриманої оцінки.

У разі неприйнятності оцінки вірогідності повторюють дії в), г) і д).

Синтез обмеженої безлічі варіантів постановок задач на розробку методів і моделей оцінки ФТС ГПА істотно залежить від прийнятих розрахункових умов.

У перелік розрахункових умов включають:

- режими роботи ГПА, на підставі яких визначається ФТС ГПА;
- види дефектів проточних частин ГТУ і ВЦН і їхньої комбінації, що враховуються в синтезованих методах і моделях;
- моделі похибок каналів виміру.

### **Режими роботи ГПА**

Залежності від характеру зміни в часі газодинамічних параметрів ГПА, режими його роботи розділяються на дві групи : перехідні й сталі.

При цьому перехідні режими ГПА, що обумовлені включенням, вимиканням, зміною частот обертання роторів ГПА, визначаються динамічними

характеристиками ГТУ і ВЦН, а також перехідними процесами в газопроводах до і після КС.

Оцінка ФТС ГПА в перехідних режимах поєднана з одночасним визначенням динамічних характеристик ГТУ, ВЦН і газопроводів. В умовах КС, при штатних вимірах параметрів ГПА, вирішення такого завдання досить проблематично. З іншого боку, досвід експлуатації ГПА показує, що ГПА більш 90 % часу працюють у сталих режимах. Виходячи з цих розумінь, у якості однієї з розрахункових умов синтезу методів і моделей приймається рішення про оцінку ФТС ГПА тільки на сталих режимах роботи ГПА.

### **Види дефектів проточних частин ГТУ і ВЦН і їх комбінації**

Питання про види дефектів проточних частин ГТУ і ВЦН і їхніх комбінацій, що враховуються в методах і моделях, варто також розглядати в декількох аспектах. Методи оцінки ФТС, природно, повинні розроблятися, виходячи з можливої наявності одного або декількох будь-яких видів дефектів проточної частини різної величини. У той же час для збільшення вірогідності одержуваних результатів, доцільно, виходячи з досвіду експлуатації, по кожному виді дефекту визначити вірогідні характеристики його розвитку в часі. З огляду на значні витрати на розробку і верифікацію математичних моделей ГТУ і ВЦН, види дефектів, що модулюють доцільно в залежності від типу ГТУ або ВЦН обмежити тільки тими видами, частота прояву яких стосовно частоти прояву усіх видів дефектів перевищує величину, що задається, (наприклад, більш 10 %). При цьому моделі ГТУ і ВЦН розробляються тільки по тих типах ГТУ і ВЦН, по яких є необхідні вихідні дані для моделювання від фірм-розроблювачів.

### **Моделі похибок каналів виміру**

Особливо важливим для одержання достовірних оцінок ФТС є ухвалення рішення про моделі похибок каналів виміру параметрів ГТУ і ВЦН. Припущення про те, що ці похибки можуть бути представлені у вигляді білого шуму з заданим середньоквадратичним відхиленням, [3, 15] не враховує

структуру похибок датчиків тиску і температури. Таке припущення приводить до завищених оцінок вірогідності.

Аналіз похибок використовуваних датчиків тиску і температури показує, що всі погрішності, що вказуються в технічних умовах, можна віднести до двох типів: систематичні й випадкові. Систематична похибку визначається основною похибкою датчика і залежить від його точності при фіксованих зовнішніх умовах, а також точності калібрування. Випадкова похибка визначається впливом на датчик зовнішніх умов і, в першу чергу, температури навколишнього середовища. Складова погрішності вітчизняних датчиків, що обумовлена температурною нестабільністю, в умовах експлуатації порівнянна або перевищує основну похибку датчика. Тому, як розрахункову умову для синтезу методів і моделей оцінки ФТС ГПА, доцільно прийняти наступну модель погрішності каналів виміру:

- кожен  $X_i$  канал вимірів має систематичну похибку  $\delta_{cuct}(X_i)$  постійної величини і випадкову похибку  $\delta_{случ}(X_i)$ , що розподілена за нормальним законом із середньоквадратичним відхиленням  $\sigma(X_i)$  і математичним очікуванням, рівним нулю;
- для окремо взятого датчика значення  $\delta_{cuct}(X_i)$  і  $\sigma(X_i)$  є функції часу проведення випробувань. У разі, якщо випробування виконують в короткий проміжок часу, при незначній зміні навколишніх умов значення  $\sigma(X_i)$  зменшується, а  $\delta_{cuct}(X_i)$  зростає;
- для групи датчиків значення  $\delta_{cuct}(X_i)$  є некорельованими і по відношенню один до одного розташовані за рівномірним законом.

Відповідно до приведеною в розділі 1.2 процедурою синтезу методів і моделей оцінки ФТС, початковою операцією синтезу є формування обмеженої множини варіантів постановки задач для розробки цих методів і моделей. Постановка задачі визначення ФТС ВЦН повинна враховувати:

- відомі методи параметричної діагностики ВЦН, у тому числі запропоновані в даній роботі;

- існуюче розходження в номенклатурі, частоті й точності вимірів параметрів роботи ВЦН, у вимірі густини і/або складу компримованого газу;
- наявність або відсутність конструкторської документації для проточних частин ВЦН;
- штатні умови роботи ВЦН на КС.

Метод і модель оцінки ФТС ВЦН обираються виходячи з мінімуму значень методичних і інструментальних похибок визначення оцінки. Розглядаються наступні варіанти постановок завдань на розробку методів і моделей оцінки ФТС ВЦН:

а) визначення зведених показників роботи ВЦН (міри стискання, масової витрати газу через нагнітач, політропного ККД і відносної внутрішньої потужності) на основі вимірів:

- тиску і температури газу на вході і виході ВЦН;
- перепаду тиску газу на сужающем пристрої на вході ВЦН;
- частоти обертання ротора ВЦН;
- густини або складу компримованого газу.

Статистична обробка результатів визначення приведених показників за результатами періодичних вимірів параметрів ВЦН із метою зменшення впливу перемінних складових погрішностей каналів виміру. Оцінка ФТС ВЦН на основі зіставлення розрахованих приведених характеристик з відповідними паспортними;

б) газодинамічні розрахунки ВЦН при припущенні наявності найбільш ймовірних дефектів його проточної частини з урахуванням результатів вимірів тиску і температури газу на вході і виході ВЦН, частоти обертання ротора ВЦН, щільності або складу газу з метою обчислення значень дефектів і приведених показників роботи ВЦН. Визначення фактичних приведених характеристик ВЦН і значень дефектів за результатами статистичної обробки обчислених приведених показників для серії вимірів параметрів ВЦН. Оцінка ФТС ВЦН на

основі обчислених значень найбільш ймовірних дефектів проточної частини і зіставлення розрахованих приведених характеристик з відповідними паспортними;

в) визначення технічного стану ВЦН на основі експериментально виявленого взаємозв'язку зміни ККД і КТС [19, 20];

г) розрахунок КТС ВЦН за потужністю і ККД на основі методу, розробленого фахівцями російського державного університету нафти і газу ім. Губкіна [45, 46]. Як вхідну інформацію використовують дані вимірів тиску і температури газу на вході й виході ВЦН, частоти обертання ротора ВЦН, щільності або складу газу, а також дані про виміри перепаду тиску на звужуючому пристрої на вході ВЦН. Статистична обробка результатів обчислення. Оцінка ФТС ВЦН по КТС;

д) визначення приведених показників роботи ВЦН за даними вимірів тиску і температури газу на вході і виході ВЦН, частоти обертання ротора ВЦН, щільності або складу газу на основі обчислення узагальнених нормованих дефектів проточної частини ВЦН. Вибір з безлічі введених у розгляд видів дефектів одного з умови максимуму вірогідності результатів оцінки. Визначення фактичних приведених характеристик ВЦН за результатами статистичного аналізу обчислених значень узагальнених нормованих дефектів. Оцінка ФТС ВЦН на основі обчисленого значення обраного виду узагальненого нормованого дефекту проточної частини ВЦН і зіставлення розрахованих фактичних приведених характеристик з відповідними паспортними.

Безліч варіантів постановок завдання визначення ФТС ВЦН на рівні КС доцільно обмежити цими п'ятьма принципово різними варіантами. Можливі інші постановки, засновані на використанні іншого методу параметричної діагностики, можуть бути зведені до однієї з п'яти приведених вище. Вибір одного варіанта постановки задачі з розглянутої безлічі для наступної алгоритмічно-програмної реалізації здійснюється, виходячи з мінімуму методичної і інструментальної похибок визначення оцінок ФТС. Мінімізація цих похибок забезпечує максимум вірогідності результатів оцінки. Складові

методичної похибки для варіанта постановки задачі визначення ФТС ВЦН істотно залежать від наявності або відсутності виміру продуктивності ВЦН.

Методична похибка оцінки ФТС при вимірі продуктивності ВЦН (варіанти а) і г)) складається з наступних складових:

- похибки визначення основних показників процесу стискання газу: політропного ККД, зведеної ступіні стискання, зведеної відносної внутрішньої потужності ВЦН;
- похибки (для варіанта г)), обумовленої введенням припущення про характер зсуву фактичних приведених характеристик щодо паспортних (прямого "зрушенні" фактичної характеристики політропного ККД щодо паспортної);
- похибки представлення оцінок ФТС у виді КТС, постійних для всього діапазону об'ємної продуктивності ВЦН (для варіанта г));
- похибки зіставлення приведених фактичних і паспортних характеристик, обумовлених використанням різних рівнів технічного стану ВЦН при розрахунку фактичних і паспортних характеристик;
- методичної похибки виміру продуктивності за перепадом тиску на звужуючому пристрої;
- помилок осереднення результатів визначення процесу стиснення газу, обумовлених наявністю випадкових складових похибок виміру параметрів ВЦН.

У варіантах постановки задач, що не передбачають вимір продуктивності ВЦН (варіанти б) і д)), методична похибка оцінки ФТС включає наступні складові:

- а) похибки моделі газодинамічних процесів у проточній частині ВЦН з урахуванням можливої наявності одного або декількох видів дефектів;
- б) похибки визначення основних показників процесу стиснення газу: політропного ККД, приведенного ступеня стиску, приведеної відносної внутрішньої потужності ВЦН;
- в) похибки зіставлення приведених фактичних і паспортних характеристик, обумовлених використанням різних рівнів технічного стану ВЦН при розрахунку фактичних і паспортних характеристик;
- г) похибки визначення узагальненого нормованого дефекту пов'язані з уведенням безлічі розрахункових характеристик для його визначення (варіант д));



д) помилки осереднення результатів обчислення показників процесу стиску газу, що обумовлені наявністю випадкових похибок виміру параметрів ВЦН.

Методична похибка варіанта в), заснованого на експериментально встановленому взаємозв'язку зміни ККД і його витратно-напірної характеристики головним чином визначається:

- похибками експериментального визначення взаємозв'язку зміни ККД і його витратно-напірної характеристики у всьому діапазоні об'ємної продуктивності при наявності можливих дефектів проточної частини різної величини;
- похибками апроксимації експериментально знайдених залежностей взаємозв'язку з лінійною функцією, як пропонується в методі [19].

Інші складові методичної похибки у варіанті в) незначні стосовно двох складових, що відзначені вище.

Інструментальні похибки, що враховують при розгляді варіантів, визначаються складом вимірюваних параметрів ВЦН і похибками виміру цих параметрів.

У варіантах постановок задачі (варіанти а) і г)) при вимірі продуктивності ВЦН необхідно додатково враховувати похибки датчика перепаду тиску, встановленого на звужуючому пристрої.

Похибки виміру параметрів ВЦН визначаються сформульованою в розділі 1.4.1 моделлю погрішностей каналів виміру, що передбачає наявність випадкової і систематичної складових. Точну оцінку впливу інструментальних похибок можна одержати тільки шляхом моделювання процесу оцінки ФТС конкретним методом для конкретного типу ВЦН.

На початковому етапі вибору методу оцінки ФТС, враховуючі на проведені в кожному варіанті постановки задачі операції із зменшення впливу похибок каналів виміру на визначення показників роботи ВЦН припускаємо, що інструментальні похибки оцінки ФТС від похибок виміру тиску і температури газу на вході й виході ВЦН для різних постановок однакові.

Наступний аналіз постановок задачі заснований на зіставленні складових похибок усіх розглянутих варіантів. При цьому необхідно врахувати, що безпосереднє визначення окремих складових похибок не представляється можливим. Наприклад, оцінка методичної похибки визначення об'ємної продуктивності ВЦН є досить складною самостійною задачею, що до дійсного часу не вирішена. Тому пропонується в подібних випадках використовувати експертні оцінки або результати моделювання.

Аналізуючи методичні й інструментальні похибки розглянутих варіантів постановок задач оцінки ФТС необхідно відзначити наступне.

У варіанті визначення фактичних зведених характеристик ВЦН відповідно до [42] (варіант а)) домінуючими похибками оцінки ФТС є:

- методична й інструментальна похибки визначення об'ємної продуктивності ВЦН (сумарна до 20 %);
- інструментальні похибки, обумовлені наявністю систематичних погрешностей у каналах виміру тиску і температури газу на вході і виході ВЦН (сумарно до 6 %).

Решта похибок не перевищують 3 % .

Похибка оцінки ФТС по КТС ВЦН (варіант г)) щодо варіанта а) додатково збільшується за рахунок похибок, обумовлених припущенням про незалежність КТС від об'ємної продуктивності ВЦН і прямому "зсуві" фактичної характеристики політропного ККД щодо паспортної. Сумарна додаткова похибка від прийняття цих припущень для різних типів ВЦН знаходиться в межах 5 ÷ 15 %.

Домінуючими похибками оцінки ФТС при їхньому визначенні за допомогою газодинамічного розрахунку ВЦН є:

- методична похибка моделі газодинамічних процесів проточної частини при можливій наявності одного або декількох видів дефектів;
- інструментальні похибки, що обумовлені наявністю систематичних похибок у каналах виміру тиску і температури газу на вході і виході ВЦН (сумарно до 6 %).

Відзначена методична похибка істотно залежить від схеми розрахунку (розрахунок абсолютних значень фактичних параметрів або відхилень фактичних параметрів від цих же параметрів ВЦН, що були на початку експлуатації при однакових режимах роботи ВЦН), від повноти обліку різних втрат, від виконання необхідних експериментальних досліджень і наступному обліку результатів цих досліджень в алгоритмах моделі. За виконаними оцінками для деяких типів ВЦН ця методична похибка складає величину порядку 5 %.

У варіанті оцінки ФТС на основі обчислення узагальнених нормованих дефектів (варіант д)) домінуючими похибками є:

- методична похибка, обумовлена введенням безлічі розрахункових характеристик і визначення узагальненого дефекту по цих характеристиках. За результатами виконаних теоретичних і експериментальних досліджень ця похибку не перевищила 5 %;
- інструментальні похибки, обумовлені наявністю систематичних похибок у каналах виміру тиску і температури газу на вході й виході ВЦН (сумарно до 6 %).

Особливу складність викликає визначення методичних похибок варіанту оцінок ФТС, заснованого на експериментально виявленому взаємозв'язку зміни ККД ВЦН зі зсувом його витратно-напірної характеристики. Складність полягає в тому, що систематизовані експериментальні дані існують для обмеженої кількості типів ВЦН, обмеженого діапазону об'ємної продуктивності ВЦН і конкретних значень дефектів. Для одержання методичної похибок для варіанта д) потрібна зміна частоти обертання ВЦН до 10 % і більш, що в умовах КС, у більшості випадків, неможливо. Теоретичні ж дослідження показують, що похибка визначення зниження ККД через наявність дефектів даного варіанту не менше, ніж у варіанті визначення фактичних зведених характеристик за методикою ВНІГАЗ.

Нижче наведено варіанти постановок задач розробки методів і моделей оцінки ФТС на рівнях УМГ, ДК "Укртрансгаз" і на рівні КС.

Характерними відмінностями визначення оцінки ФТС ГПА на рівнях УМГ і ДК "Укртрансгаз" є значні невірогідність і невизначеність інформації,

що надходить про параметри ГПА. Обсяг цієї інформації по кожному конкретному ГПА набагато менше стосовно наявній на КС.

Розглянуті вище варіанти постановки задачі оцінки ФТС ВЦН показали, що оцінка ФТС на рівні УМГ принципово можлива за допомогою кожного з розглянутих варіантів за умови періодичної передачі на рівень УМГ поагрегатних даних. Однак практика свідчить про те, що на рівень УМГ поагрегатна інформація з деяких КС передається не в повному обсязі. По цим КС передаються цехові дані про тиск і температуру газу на вході і виході КС, середні по цеху частоти обертання ВЦН, дані про щільність газу і про атмосферні умови. Інформація про обсяги газу, що перекачується, не передається. Таким чином, на рівні УМГ для оцінки ФТС у цьому випадку необхідно використовувати кілька методів залежності від періоду й обсягів надходження інформації з КС.

У випадку періодичного надходження на рівень УМГ поагрегатних даних, виходячи з мінімуму значень методичних і інструментальних похибок оцінок ФТС доцільно використовувати один із двох методів оцінки - оцінку на основі газодинамічного розрахунку проточної частини або оцінку на основі обчислення узагальненого нормованого дефекту. Методичні й інструментальні похибки оцінки ФТС ВЦН цих методів відрізняються незначно при тих самих похибках каналів виміру параметрів ГПА. Але, з огляду на значно менший обсяг інформації, що надходить на рівень УМГ, стосовно наявній на КС, значно велику неввірогідність і невизначеність цієї інформації, а також велику кількість ВЦН, більш зручним на рівні УМГ є метод оцінки ФТС на основі обчислення узагальненого нормованого дефекту [18].

Задача оцінки ФТС ВЦН за цеховими даними, що містять інформацію щодо працюючих агрегатів, раніше не розглядалась. Вона полягає в тім, щоб за сукупністю цехових даних для різних комбінацій працюючих ВЦН на визначеному тимчасовому інтервалі установити індивідуальні оцінки ФТС ВЦН.

Дана задача вирішується при наступних припущеннях і умовах:

- втрата тиску газу у вхідному й вихідному колекторах КЦ по кожному ВЦН однакова або відома;
- ВЦН включені паралельно;

- температура газу на виході КЦ при паралельній схемі включення ВЦН визначається згідно з формулою

$$T_{\text{вих}} = \frac{\sum_{i=1}^{Nr} T_{\text{вих } i} \cdot Q_{\text{ком } i}}{\sum_{i=1}^{Nr} Q_{\text{ком } i}}, \quad (1.1)$$

де  $T_{\text{вих}}$  – температура газу на виході з КЦ (до приладу повітряного охолодження),

$T_{\text{вих } i}$  – температура газу на виході  $i$ -го працюючого ВЦН,

$Q_{\text{ком } i}$  – комерційна продуктивність  $i$ -го працюючого ВЦН,

$N_r$  – число ВЦН, що включені в роботу;

- зміна величин дефектів проточної частини ВЦН у функції часу на оцінюваному тимчасовому інтервалі лінійно;
- узагальнений цеховий дефект із достатньою точністю може бути представлений у вигляді лінійної комбінації дефектів ВЦН. Під узагальненим цеховим дефектом розуміється характеристика середнього по цеху ступеня зношеності проточних частин ВЦН, що визначається по вимірах параметрів цехової автоматики відповідно до тих же формульних залежностей (політропним методом Шульца), що й узагальнений нормований дефект окремого ВЦН;
- кількість комбінацій ВЦН, що включаються одночасно в роботу на тимчасовому інтервалі має бути достатньою для визначення оцінок ФТС усіх працюючих на цьому інтервалі ВЦН методом найменших квадратів або іншим методом математичної статистики.

При виконанні даних умов і припущень пропонується наступний варіант рішення задачі оцінки ФТС на базі цехових даних. На основі методу обчислення узагальненого нормованого дефекту по цеховим даним для кожного виміру параметрів визначається середній по цеху узагальнений дефект. Формується масив середніх по цеху узагальнених дефектів і відповідний масив даних по номерах ВЦН, що включені в роботу на оцінюваному тимчасовому інтервалі. Потім за допомогою методу найменших

квадратів або іншого методу статистичної обробки, середні по цеху дефекти "розщеплюються" на індивідуальні.

Виходячи з аналізу значень методичних і інструментальних погрішностей різних варіантів постановок задачі оцінки ФТС ВЦН можна зробити висновок, що для наступної розробки задачі оцінки ФТС ВЦН на рівні КС доцільно використовувати варіант оцінки ФТС на основі газодинамічного розрахунку проточної частини або варіант на основі обчислення узагальнених нормованих дефектів проточної частини. Однак, з огляду на можливість наступного підвищення точності газодинамічного розрахунку ВЦН за рахунок обліку результатів обстеження проточної частини ВЦН при ремонті ГПА і даних по оцінці ФТС до і після ремонту, доцільно вибрати метод оцінки ФТС на основі газодинамічного розрахунку [32].

Більшість відомих методів параметричної діагностики ГТУ [15, 17, 34] вирішують задачу визначення одного з двох можливих станів: справна або несправна без визначення конкретного несправного вузла. Така постановка задачі докорінно відрізняється від шуканої, у якій оцінки ФТС визначаються тільки для справного стану ГТУ. Слід також зазначити, що, як правило, методи параметричної діагностики [19, 46] обмежуються визначенням режимних параметрів і коефіцієнтів технічного стану і не передбачають визначення фактичних дросельної й універсальної характеристик ГТУ. З урахуванням приведених зауважень розглядаються наступні три варіанти постановок задач на розробку методів і моделей оцінки ФТС ГТУ.

***Варіант а):***

- формування діагностичних матриць на основі сукупності функціональних характеристик, що визначають газодинамічні процеси в ГТУ для сукупності режимів її роботи, що задається, [19];
- розрахунок і наступна фільтрація діагностичних ознак (параметрів) за серією вимірів;
- визначення оцінок ФТС ГТУ за фільтрованим значенням діагностичних ознак.

**Варіант б):**

- обчислення в багатопараметричному просторі інформаційної відстані  $\tilde{H}$ , що характеризує ступінь віддалення фактичного стану ГТУ від її ісходного стану [53] за серією вимірів параметрів установки;
- визначення оцінок ФТС ГТУ за обчисленим значенням інформаційної відстані  $\tilde{H}$ .

**Варіант в):**

- дослідження впливу різних конкретних видів дефектів проточної частини ГТУ на дросельну й універсальну характеристики установки;
- вибір сукупності видів узагальнених нормованих дефектів ГТУ й одержання відповідних їм розрахункових характеристик за результатами досліджень;
- розрахунок безлічі значень режимних параметрів ГТУ й узагальнених нормованих дефектів за серією вимірів її параметрів;
- вибір найбільш ймовірного виду узагальненого дефекту на основі розрахованої безлічі відповідно до заданого критерію максимальної вірогідності;
- визначення фактичних зведених характеристик ГТУ за обраним видом і величиною узагальненого нормованого дефекту.

Порівнюючи ці три варіанти постановки задачі в частині методичної погрішності оцінки ФТС слід зазначити.

Варіант а): діагностичні матриці формуються, як правило, за номінальними (паспортними) характеристиками ГТУ. У протилежному випадку діагностичні матриці можуть формуватися для характеристик ГТУ, що задаються і мають бути розраховані для середньої або заданої величини зносу проточної частини. Фактичне ФТС ГТУ при формуванні діагностичних матриць не враховується.

Існують значні труднощі визначення фактичних характеристик ГТУ за діагностичними ознаками. Для їхнього подолання необхідно для кожного типу ГТУ проводити дослідження взаємозв'язку зміни діагностичних ознак і відповідних їм фактичних характеристик ГТУ.

У варіанті б) інформаційна відстань  $\tilde{H}$ , що характеризує ступінь віддалення фактичного стану ГТУ від її ісходного на початок експлуатації

розглядається як скалярна величина. Отже, функція зсуву фактичних характеристик ГТУ щодо відповідних паспортних заздалегідь визначена і відповідає розвитку визначеного сполучення конкретних дефектів проточної частини ГТУ. Дане сполучення може бути найбільш ймовірним, але, у той же час, для оцінки похибки визначення фактичних характеристик потрібно провести теоретичні дослідження і натурні випробування по визначенню функцій зсуву і для інших сполучень значень конкретних дефектів проточної частини. У протилежному випадку, без проведення цих досліджень величина погрішності оцінки ФТС ГТУ є невизначеною.

Таким чином, у варіантах а) і б) постановок, також як і у варіанті в), необхідно для кожного типу ГТУ провести дослідження впливу на зміну положення фактичних характеристик щодо паспортних у функції від конкретних видів дефектів. У третьому варіанті постановки результати цього дослідження використовують для визначення необхідної сукупності узагальнених нормованих дефектів (зваженої суми конкретних видів дефектів проточної частини ГТУ) виходячи зі значень констант, що задають, ранжирування. Цими константами, по суті, визначається методична похибка оцінки ФТС, обумовлена переходом від нескінченної множини сполучень конкретних дефектів проточної частини ГТУ до кінцевої безлічі.

Найбільшу методичну похибку оцінки ФТС у порівнянні з варіантами б) і в) має варіант а) внаслідок того, що діагностичні матриці визначаються за паспортними характеристиками ГТУ або характеристиками, що задаються і не залежать від фактичних дефектів проточної частини.

У варіанті б) методична похибка визначається відмінністю положення фактичних характеристик для найбільш ймовірного сполучення конкретних дефектів від положення відповідних фактичних характеристик для інших можливих сполучень дефектів. Стосовно варіанта в) методична похибку оцінки ФТС у варіанті б) значно більше і залежить від конкретного типу ГТУ.

Виходячи з наведеного, в якості методу оцінки ФТС обрано метод, що передбачає визначення виду і величини узагальненого нормованого дефекту проточної частини ГТУ виходячи з критерію максимуму вірогідності і наступного визначення фактичних приведених характеристик установки.



### 1.3. ІСХОДНІ (ПАСПОРТНІ) ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ

Необхідна умова аналізу технічного стану ВЦН на основі дослідження відхилення фактичних зведених характеристик від відповідних паспортних (альбомних) - це єдина методична база виконання теплотехнічних і газодинамічних розрахунків для визначення цих характеристик. Ці розрахунки повинні спиратися на методи, що регламентовані для використання при іспитах ГПА. У відповідності до рекомендацій ISO 5389 [61] і методичних указівок [42] у якості єдиної методичної бази розрахунку ефективності процесів політропного стиснення доцільно прийняти політропний метод Шульца з використанням як базове рівняння стану газу - модифіковане рівняння "Бенедикта-Вебба-Рабіна"

.Паспортні характеристики ВЦН, що наведені в альбомі [1], отримані відповідно до ДСТ 20440-75. Формули, за якими проводиться оцінка ефективності процесу політропного стиснення [10] і які регламентуються цим ДСТ, відмінні від тих, що наведені в ISO 5389.

Тому виникає необхідність перерахунку й узгодження паспортних альбомних характеристик. Перерахунок і узгодження паспортних характеристик виконують в два етапи [8].

На першому етапі на основі паспортних даних, наведених в альбомі [1], розраховують безліч векторів стану ВЦН  $\{X_{l,t}^r\}$  за обраними значеннями зведеної об'ємної продуктивності  $Q_{np\ l}$  і відносної зведеної частоти обертання

ротора ВЦН  $\left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ t}$

$$\left\{ X_{l,t}^r = f \left( Q_{np\ l}, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ t} \right) \right\}, \quad l = \overline{1, NQ} \text{ и } t = \overline{1, NN}, \quad (1.2)$$

$$\text{де } X_{l,t}^r = \left\{ P_{ex\ l,t}^r; P_{вых\ l,t}^r; T_{ex\ l,t}^r; T_{вых\ l,t}^r; \left[ \frac{n}{n_H} \right]_{np\ t}; \rho_{l,t}; Q_{np\ l} \right\},$$

символ  $r$  тут і далі за текстом позначає параметри, що розраховують, а не вимірюють датчиками агрегатної або цехової автоматики.

На другому етапі відповідно до рекомендацій ISO 5389 по розрахованій безлічі векторів стану  $\{ X_{l,t}^r \}$  визначаються уточнені паспортні дані ВЦН.

На кожному з етапів прийнята наступна послідовність обчислень.

На початку першого етапу знаходять значення  $\rho, T_{ex}, P_{ex}$  виходячи з умови рівності обчислюваних значень коефіцієнта стиснення,  $Z$ , газової постійної  $R$  і температури газу на вході  $T_{ex}$  відповідно до розрахункових значень зведення  $[T_H]_{np}, R_{np}, Z_{np}$ , наведені в альбомі [1].

Значення коефіцієнта стиснення  $Z$ , політропного ККД і зведеної відносної внутрішньої потужності повинні розраховуватися за тими же формулами, розраховувалися альбомні паспортні характеристики. Далі весь діапазон змін зведеної об'ємної продуктивності  $Q_{np}$  (від  $Q_{min}$  до  $Q_{max}$ ) розбивають на рівномірні інтервали. Для кожного елемента отриманого масиву  $\{Q_{np\ l}\}$ ,  $l = \overline{1, NQ}$  і кожного елемента масиву зведеної відносної частоти обертання

ротора  $\left\{ \left[ \frac{n}{n_H} \right]_{np\ t} \right\}$ ,  $t = \overline{1, NN}$ , шляхом лінійної інтерполяції послідовно

обчислюють такі параметри:

$\varepsilon_{l,t}$  – міра стиснення відповідно до паспортної характеристики

$$\varepsilon_{l,t} = f_1^n \left( Q_{np\ l}, \left[ \frac{n}{n_H} \right]_{np\ t} \right), \quad (1.3)$$

$\eta_{пол\ l}$  – політропний ККД відповідно до паспортної характеристики

$$\eta_{пол\ l} = f_2^n(Q_{np\ l}), \quad (1.4)$$

$\left[\frac{N}{\rho}\right]_{np\ l}$  – зведена відносна внутрішня потужність згідно до паспортної характеристики

$$\left[\frac{N}{\rho}\right]_{np\ l} = f_3^n(Q_{np\ l}). \quad (1.5)$$

Елементи розрахункового вектору стану  $X_{l,t}^r$  визначають на основі обчислених параметрів у такий спосіб:

$$P_{ex\ l,t}^r = P_{ex}, \quad (1.6)$$

$$P_{вых\ l,t}^r = P_{ex} \cdot \varepsilon_{l,t}, \quad (1.7)$$

$$T_{ex\ l,t}^r = T_{ex}, \quad (1.8)$$

$$\rho_{l,t} = \rho. \quad (1.9)$$

Температуру на виході ВЦН  $T_{вых\ l,t}^r$  визначають за умов рівності політропного ККД  $\eta_{пол\ l,t}^r$ , розрахованого за параметрами  $P_{ex\ l,t}^r$ ,  $P_{вых\ l,t}^r$ ,  $T_{ex\ l,t}^r$ ,  $T_{вых\ l,t}^r$ ,  $\rho_{l,t}$ , значенню  $\eta_{пол\ l}$ , розрахованому за паспортною характеристикою.

З метою перевірки отриманих результатів по цих же параметрах обчислюють розрахункову зведену відносну внутрішню потужність  $\left[\frac{N}{\rho}\right]_{np\ l}^r$ .

Визначають різницю  $\left[\frac{N}{\rho}\right]_{np\ l}^r(Q_{np\ l}) - \left[\frac{N}{\rho}\right]_{np\ l}(Q_{np\ l})$ . У випадку, якщо ця різниця

за модулем перевищить припустиме значення  $\delta N$ , то вирішують задача узгодження паспортних (альбомних) характеристик.

При узгодженні паспортних характеристик необхідно визначити дві з трьох характеристик (витратно-напірну і політропного ККД або витратно-

напірну і зведеної відносної внутрішньої потужності) за якими буде уточнюватися третя.

У разі вибору пари витратно-напірна і зведена відносна внутрішня потужність, значення  $T_{вих\,l,t}^r$  і  $\eta_{пол\,l}^r$  уточнюють з умов

$$\left| \left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np}^r (Q_{np\,l}) - \left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np} (Q_{np\,l}) \right| < \delta N, \quad (1.10)$$

де  $\delta N$  – константа, що визначає точність узгодження потужності

Погоджений масив паспортних даних, утворений за політропним ККД формується як  $\eta_{пол\,l}^c = \eta_{пол\,l}^r$ .

У другому випадку, при виборі пари характеристик витратно-напірної і політропного ККД значення  $T_{вих\,l,t}^r$  і  $\left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np\,l}^r (Q_{np\,l})$  уточнюють за умов

$$\left| \eta_{пол\,l}^r - \eta_{пол\,l} \right| < \delta \eta, \quad (1.11)$$

де  $\delta \eta$  – константа, що визначає точність узгодження ККД.

Погоджений масив паспортних даних зведеної відносної внутрішньої потужності формується як

$$\left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np}^c (Q_{np\,l}) = \left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np}^r (Q_{np\,l}). \quad (1.12)$$

Безпосередньо політропний ККД і зведену відносну внутрішню потужність розраховують за наступними залежностями.

Функцію стиснення і поправка теплоємності розраховують на основі модифікованого рівняння стану "Бенедикта-Вебба-Рабіна" за значеннями зведеного тиску і температури з використанням лінійної інтерполяції для густини газу.

Коефіцієнти стиснення і поправки теплоємності обчислюють з наступної системи рівнянь [42]:

$$Z^3 - Z^2 - Z\left(\frac{a_1}{\tau} - \frac{a_2}{\tau^2} - \frac{a_3}{\tau^4}\right)\pi - \left(\frac{a_4}{\tau^2} - \frac{a_5}{\tau^3} - \frac{a_6}{\tau^5}\right) = 0, \quad (1.13)$$

$$\frac{1}{Y} = 1 + \frac{1}{Z} \left[ Z - 1 + \left( a_4 - \frac{a_5}{\tau} + \frac{a_6}{\tau^3} \right) \frac{\pi^2}{\tau^2 \cdot Z^2} \right], \quad (1.14)$$

$$V = \frac{Y}{Z} \left[ \left( \frac{a_2}{\tau} + \frac{3a_3}{\tau^3} \right) \frac{\pi}{Z\tau} + \left( \frac{a_5}{\tau} - \frac{3a_6}{\tau^3} \right) \frac{\pi^2}{Z^2\tau^2} + Z \right] - 1, \quad (1.15)$$

$$\Delta C_p = \left( \frac{Z(1+V)^2}{Y} + \frac{6 \cdot a_3 \cdot \pi}{Z\tau^4} - \frac{3 \cdot a_6 \cdot \pi^2}{Z^2\tau^5} - 1 \right) \cdot R, \quad (1.16)$$

де  $a_1, \dots, a_6$  – коефіцієнти рівняння стану,

$Z$  – коефіцієнт стиснення,

$Y$  – коефіцієнт ізотермічного стиснення,

$V$  – коефіцієнт ізобарного стиснення,

$\Delta C_p$  – поправка для визначення теплоємності,  $\text{Дж/кг} \cdot \text{K}$ .

Значення коефіцієнтів відповідно до [42] для різних значень густини газу наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнтів рівняння стану

Газ	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$\rho, \text{кг/м}^3$
Варіант № 1 (ГОСТ 23194)	0,1237	0,3468	0,1188	0,0291	0,0273	0,0390	0,562
Варіант № 2	0,1251	0,3446	0,1314	0,0297	0,0292	0,0428	0,597
Варіант № 3	0,1235	0,3417	0,1443	0,0303	0,0312	0,0464	0,671

Зведені тиск, температура і критичні параметри газу  $P_{кр}$  і  $T_{кр}$  визначають за формулами

$$\pi = \frac{P}{P_{кр}}, \quad (1.17)$$

$$\tau = \frac{T}{T_{кр}}, \quad (1.18)$$

$$P_{кр} = 47,9 - d, \text{ кгс/см}^2, \quad (1.19)$$

$$T_{кр} = 99,8 - 162,8 \cdot d, \text{ К}, \quad (1.20)$$

де  $P$  – тиск газу,  $\text{кгс/см}^2$ ,

$T$  – температура газу,  $\text{К}$ ,

$d$  – відношення густини газу до густини повітря,

$$d = \frac{\rho}{\rho_в} = \frac{R_{в\text{озд}}}{R}, \quad (1.21)$$

де  $R_{в\text{озд}}$  – газова стала повітря, що дорівнює  $287,00, \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}$ ,

$\rho_в$  – густина повітря,  $\text{кг/м}^3$ .

Молярна маса природного газу дорівнює

$$M = \frac{8314,51}{R \cdot 9,80665}, \text{ кг/к}\cdot\text{моль}. \quad (1.22)$$

Зведений тиск газу на вході у ВЦН

$$\pi_1 = \frac{P_{ex\ l,t}^r + P_a}{P_{кр}}, \quad (1.23)$$

де  $P_a$  – атмосферний тиск,  $\text{кгс/см}^2$ .

Зведена температура газу на вході у ВЦН

$$\tau_1 = \frac{T_{ex\ l,t}^r}{T_{кр}}. \quad (1.24)$$

Зведений тиск газу на виході з ВЦН

$$\pi_2 = \frac{P_{вых\ l,t}^r + P_a}{P_{кр}}. \quad (1.25)$$

Зведена температура газу на виході з ВЦН

$$\tau_2 = \frac{T_{вых\ l,t}^r}{T_{кр}}. \quad (1.26)$$

Коефіцієнт стиснення на вході  $Z_{1H}$  знаходять з розв'язання рівняння стану при  $\pi = \pi_1$  і  $\tau = \tau_1$ .

Коефіцієнт стиснення на виході  $Z_{2H}$  знаходять з розв'язання рівняння стану при  $\pi = \pi_2$  і  $\tau = \tau_2$ .

Середній коефіцієнт стиснення

$$Z_{cp} = \frac{Z_{1H} + Z_{2H}}{2}. \quad (1.27)$$

Коефіцієнти ізобарного стиснення на вході нагнітача  $V_{1H}$  і на виході  $V_{2H}$  знаходять з розв'язання рівняння стану.

Середній коефіцієнт ізобарного стиснення

$$V_{cp} = \frac{V_{1H} + V_{2H}}{2}. \quad (1.28)$$

Мольна теплоємність газу на вході відповідно до [42]

$$MC_{p01} = (21600 + (23,7 + 0,071 \cdot T_{ex\ l,t} - 273,15) \cdot d) \cdot 1000, \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{К}. \quad (1.29)$$

Мольна теплоємність газу на виході

$$MC_{p02} = (21600 + (23,7 + 0,071 \cdot T_{вых\ l,t} - 273,15) \cdot d) \cdot 1000, \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{К}. \quad (1.30)$$

Питома теплоємність газу в ідеальному газовому стані на вході нагнітача

$$C_{p01} = \frac{MC_{p01}}{M}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}. \quad (1.31)$$

Питома теплоємність газу в ідеальному газовому стані на виході нагнітача

$$C_{p02} = \frac{MC_{p02}}{M}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}. \quad (1.32)$$

Поправки теплоємності газу на вході  $\Delta C_{p1}$  і на виході нагнітача  $\Delta C_{p2}$  знаходять з рівняння стану.

Питома теплоємність газу на вході нагнітача

$$C_{p1} = C_{p01} + \Delta C_{p1}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}. \quad (1.33)$$

Питома теплоємність газу на виході нагнітача

$$C_{p_2} = C_{p_{02}} + \Delta C_{p_2}, \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}. \quad (1.34)$$

Середня питома теплоємність газу

$$C_{p,cp} = 0,5 \cdot (C_{p_1} + C_{p_2}), \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}. \quad (1.35)$$

Міра стиснення

$$\varepsilon = \frac{P_{\text{вих } l,t}}{P_{\text{вх } l,t}}. \quad (1.36)$$

Температурний показник політропи

$$m_T = \lg \left( \frac{T_{\text{вих } l,t}^r}{T_{\text{вх } l,t}^r} \right) \cdot (\lg \varepsilon)^{-1}. \quad (1.37)$$

Комплекс

$$\frac{K}{K-1} = \frac{C_{p,cp}}{Z_{cp} \cdot R} - \frac{V_{cp}}{m_T}. \quad (1.38)$$

Політропний ККД

$$\eta_{\text{пол}} = \frac{K-1}{K} \cdot \frac{1}{m_T}. \quad (1.39)$$

Густина газу на вході нагнітача

$$\rho_{\text{вх}} = \frac{\rho_{l,t} \cdot T_{st} \cdot P_{\text{вх } l,t}^r}{P_{st} \cdot T_{\text{вх } l,t}^r \cdot Z_1}, \text{ кг/м}^3, \quad (1.40)$$

де  $T_{st} = 293,15$ , К,  $P_{st} = 1,033$ , кгс/см<sup>2</sup> – температура і тиск газу, при яких визначають густину газу.

Секундна витрата газу через нагнітч

$$G_{\text{сек } l} = \frac{Q_{np\ l} \cdot \rho_{\text{вх}}}{60}, \text{ кг/с}. \quad (1.41)$$

Внутрішня потужність



$$N_{u,l} = \frac{K}{K-1} \cdot Z_{cp} \cdot R \cdot [T_{\text{ввлх } l,1}^r - T_{\text{ex } l,1}^r] \cdot G_{\text{сек } l}, \text{ кВт}. \quad (1.42)$$

Зведена відносна внутрішня потужність

$$\left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np}^r (Q_{np l}) = \frac{N_{u,l}}{\rho_{\text{ex}}}. \quad (1.43)$$

Як ілюстрацію узгодження паспортних характеристик на рис.1.1 - 1.4 наведено результати розрахунків для ВЦН Ц 6.3/41-1,45.

У результаті виконаних обчислень відхилення розрахункової зведеної відносної внутрішньої потужності від паспортної після корекції та апроксимації політропного ККД (рис.1.3, 1.4) зменшилося з 38 до 2 кВт/(м<sup>3</sup>/кг).

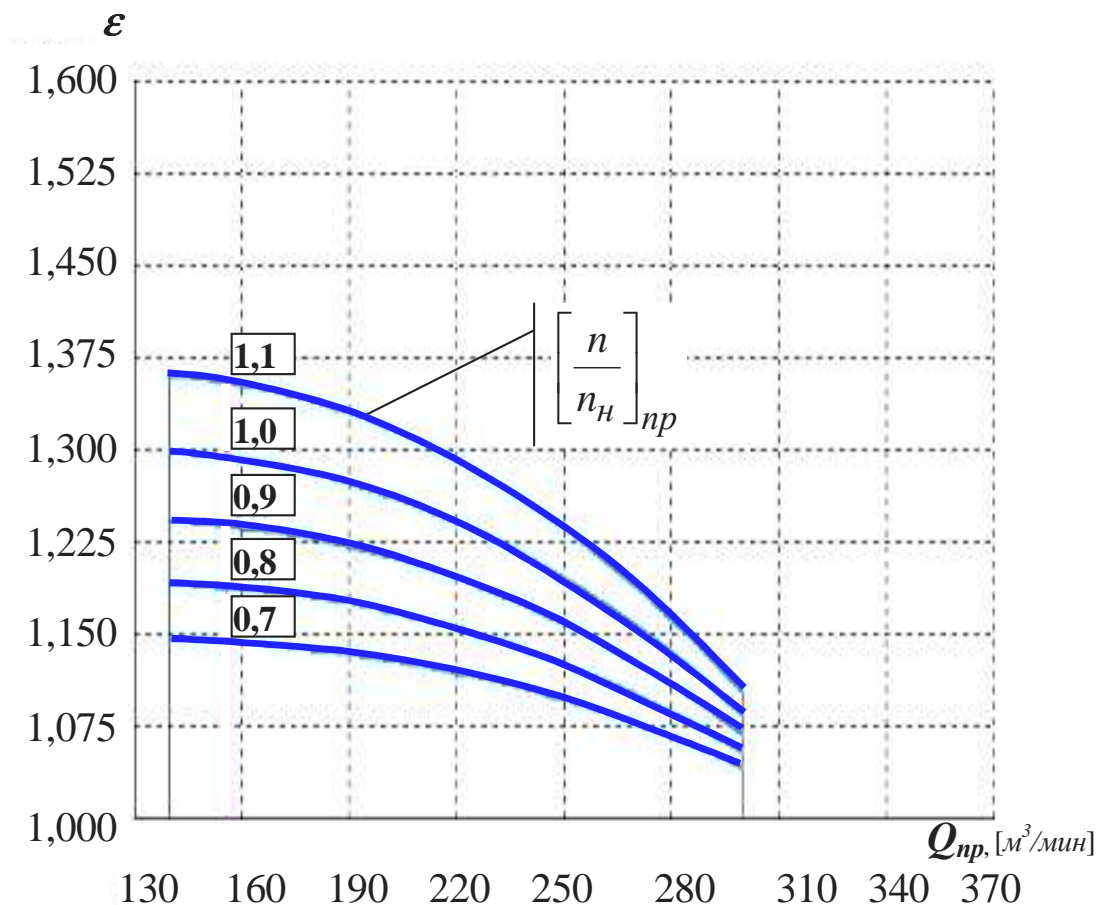
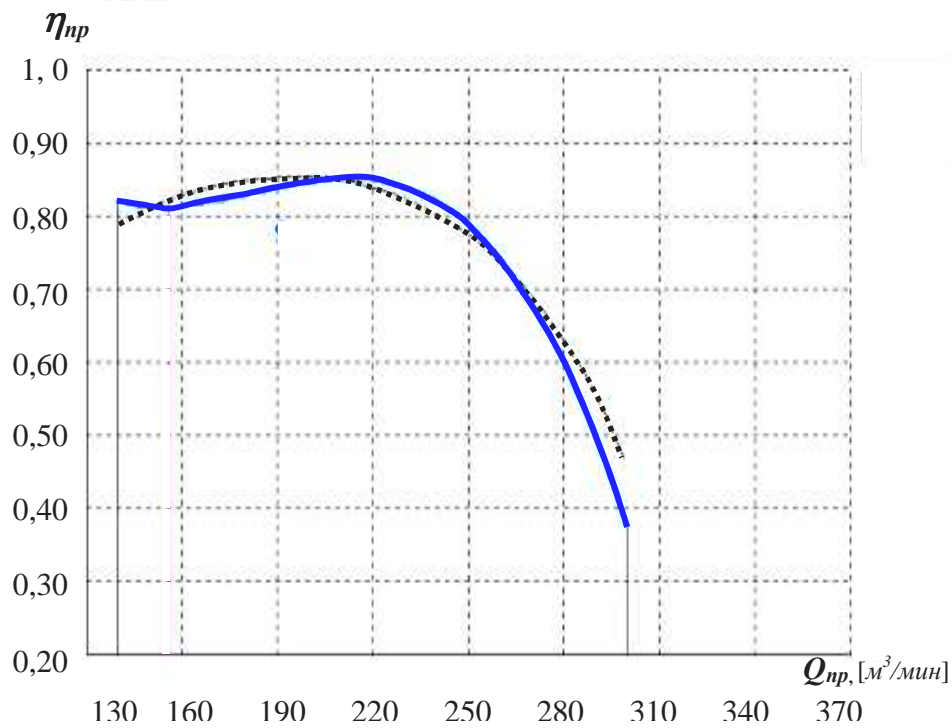
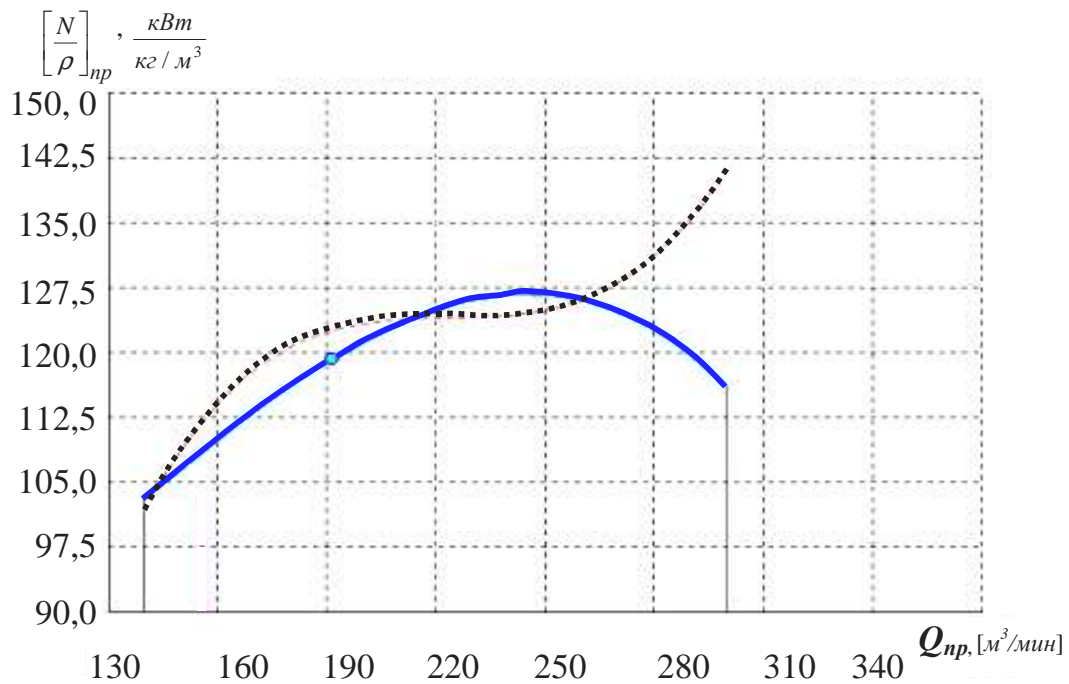


Рис. 1.1 - Графіки зміни міри стиснення у функції  $Q_{np}$   
(паспортні характеристики)



————— паспортна характеристика  
 - - - - - розраховочна після корекції політропного ККД  
 Рис. 1.2 - Графіки зміни політропного ККД у функції  $Q_{пр}$



————— паспортна характеристика  
 - - - - - розраховочна до корекції політропного ККД  
 Рис.1.3 - Графіки зміни зведеної відносної потужності у функції  $Q_{пр}$

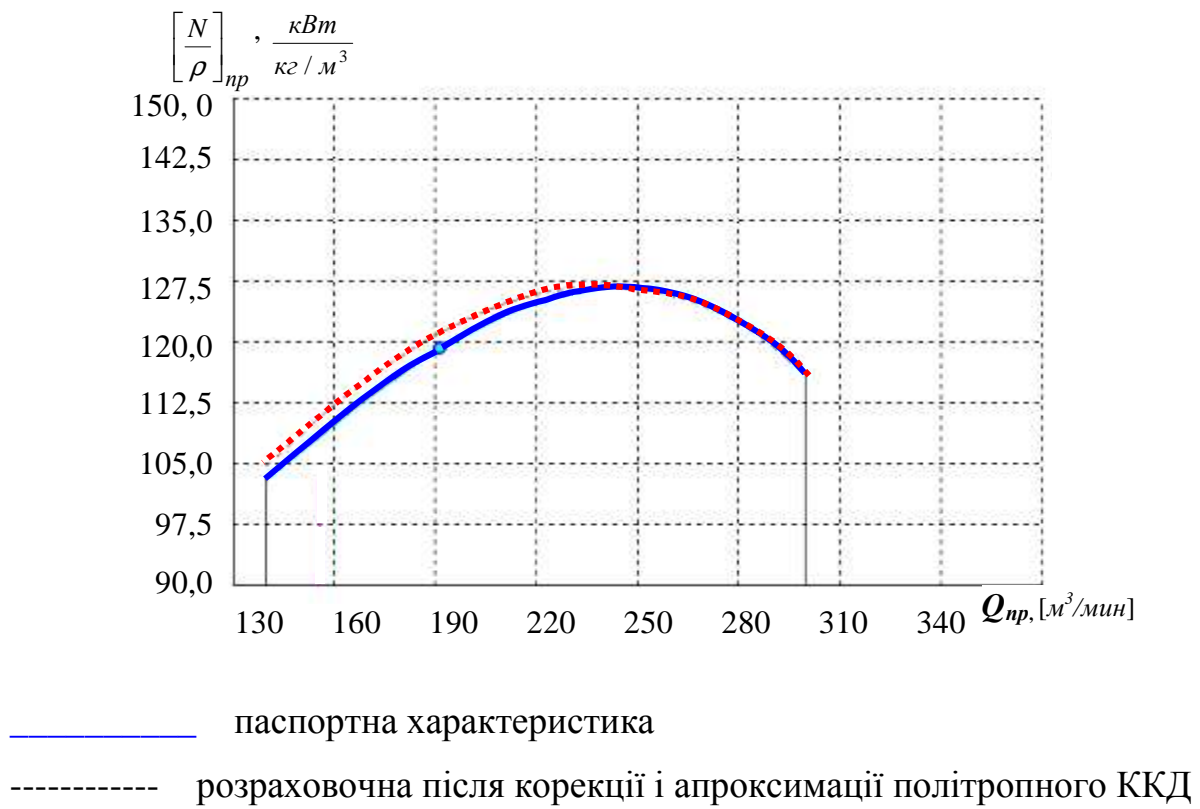


Рис.1.4 - Графіки зміни зведеної відносної потужності у функції  $Q_{np}$

## **2. ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ НА ОСНОВІ ГАЗОДИНАМІЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ**

### **2.1. ЗНОС ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Вплив експлуатаційних факторів, таких як: різні режими роботи, час наробітку, якість газу, що перекачується, якість проведення технічного обслуговування і ремонту, дотримання персоналом правил технічної експлуатації на фактичні характеристики ВЦН, виявляється у відхиленні останніх від паспортних.

Характерними змінами проточної частини ВЦН, з погляду впливу на фактичні характеристики, є:

- ерозійний знос входних направляючих апаратів, лопаток і дисків робочих колес, лопаткових або безлопаткових дифузорів;
- знос вусиків, що ущільнюють, у лабіринтових ущільненнях по покривному диску.

Для ВЦН характерні наступні прояви ерозійного зносу:

- знос входних кромek лопаток робочого колеса. На фоні загального зносу усієї входної кромки відбувається місцеве підрізування лопатки біля основи, біля робочого диска. Максимальному зносу по товщині піддаються кінці лопаток з опуклої сторони;
- знос робочого і покривного дисків на периферії. Цей знос змінюється за шириною й інтенсивно змінюється за довжиною каналу;
- ерозія входних направляючих апаратів ВЦН з тангенціальним підведенням і відводом газу і, зокрема , ерозія розділюючого ребра на вході. Ерозія входних направляючих апаратів в умовах експлуатації спостерігається лише на 1/4 частині окружності;

- знос лопаточних дифузорів (ЛД) и робочих колес (РК) ВЦН;
- ерозійний знос ущільнень покривного диска.

Знос ЛД і РК викликається проходженням піску або інших абразивних матеріалів через проточну частину. Робочі колеса нагнітача типу ВЦН-280 цілком виходять з ладу при пропуску через нагнітач, що працює на номінальних обертах ( $n_{ном} = 7950 \text{ об/мин}$ ), біля 400 кг сухого кварцевого піску з розмірами частиць  $100 \div 200 \text{ мкм}$ . При цьому відбувається знос вхідних кромок лопаток РК на  $15 \div 20 \text{ мм}$  по довжині і на  $2 \div 3 \text{ мм}$  по товщині, покривного дисків по товщині на периферії на  $1 \div 2 \text{ мм}$ .

Стосовно до ВЦН із діаметром РК  $600 \div 900 \text{ мм}$  знос вхідних крайок лопаток на  $10 \text{ мм}$  і покривного диска по товщині на  $1 \div 2 \text{ мм}$  практично не робить впливу на ККД ВЦН.

Основна причина збільшення зазорів в ущільненнях - це руйнування вусиків, що ущільнюють, унаслідок зачіпання їх об ротор. Такі зачіпання характерні для режимів пусків і остановов, підвищеного рівня вібрації. Збільшення зазорів внаслідок ерозійного зносу незначне. Таким чином, знос вусиків, що ущільнюють, знос ЛД і РК викликаються різними причинами і не можуть бути визначені як залежність від якого-небудь одного параметра, наприклад, кількості пройшовшого через проточну частину піску. Така ситуація вимагає диференційованої оцінки впливу перерахованих вище факторів на характеристики ВЦН.

Вплив збільшення зазорів в ущільненні покривного диска й ерозійного підрізу лопаток на політропний ККД і ступінь стиску деяких типів ВЦН розглянуто в роботі [56]. Результати досліджень показали, що збільшення радіального зазору в ущільненні покривного диска на  $1 \text{ мм}$ , при номінальному значенні  $0,5 - 1 \text{ мм}$ , приводить до зниження ККД у середньому на  $1,1 - 1,4 \%$ .

Величина ж зазору при експлуатації може доходити до  $4 \div 5 \text{ мм}$ . Таке збільшення зазору знижує ККД ВЦН до  $8 \%$ . Ерозійний знос лопаток робочого колеса на  $10 \text{ мм}$  в середньому знижує ККД ВЦН на  $0,6 \div 1,0 \%$ . Ерозійний знос

лопаток ЛД і РК на 10 мм практично не знижує ККД. Аналогічний вплив роблять ерозійний знос ЛД і РК, а також збільшення зазору в ущільненні покривного диска на витратно-напірну характеристику ВЦН. Однак, ступінь цього впливу в  $3 \div 5$  раз менш, ніж на характеристику політропного ККД.

Оцінюючи вплив перерахованих факторів на зниження ККД і на зміну витратно-напірної характеристики, слід зазначити, що найбільший вплив робить збільшення зазорів в ущільненнях покривного диска й у меншій ступені впливає ерозійний знос лопаток РК і ЛД.

У результаті зносу елементів проточної частини відбувається зрушення фактичних характеристик ВЦН щодо паспортних. Поряд зі зрушенням цих характеристик має місце також зміна їхньої форми.

Представлений нижче метод визначення фактичних характеристик і параметрів режиму роботи ВЦН на основі газодинамічного розрахунку параметрів проточної частини ґрунтується на врахуванні зносу ущільнення покривного диска, як основного фактора впливу зносу елементів проточної частини на функціонально-технічний стан ВЦН. Такий підхід до врахування зносу елементів проточної частини підтверджується експериментальними даними, отриманими при розкритті ВЦН для ремонту.

## **2.2. МЕТОД ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА НА ОСНОВІ ГАЗОДИНАМІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ**

Течія реального газу через систему каналів і ґрат профілів ВЦН характеризується рядом особливостей, що впливають на рівень втрат і, як наслідок, на його фактичні характеристики.

До числа таких особливостей слід віднести [13, 18, 37, 57 - 60]:

- просторовий характер течії газу. Термодинамічні й кінематичні параметри потоку в різних точках мають неоднакові значення. Ця нерівномірність параметрів змінюється при переході від режиму до режиму;

- нестационарний характер течії газу. В'язкість газу, кривизна каналів та ряд інших факторів визначають появу нерівномірної епюри швидкостей і тисків за ґратами. У цих умовах наявність у ВЦН нерухомих і обертових ґрат приводить до нестационарної течії потоку навіть при постійності витрати і частоті обертання;
- істотний вплив стискання газу при течії через ВЦН, що виявляється в тім, що при досягненні на якому-небудь з елементів проточної частини критичних чисел Маху виникають хвильові ефекти пов'язані як з ростом втрат, так і з кризою витрати (запирання проточної частини);
- формування прикордонних шарів на обтічних поверхнях за рахунок в'язкості газу, що впливають на величину втрат. Зважаючи на те, що характер течії в елементах ВЦН носить дифузійний характер, в'язкість впливає на стійкість прикордонних шарів і відрив потоку від стінок каналів;
- турбулентність потоку у ВЦН, що робить вплив на характер течії газу і втрати енергії.

Відзначені особливості визначають необхідність урахування втрат у наступних елементах ВЦН:

- втрати в каналах, сформованих направляючими лопатками, лопатками РК і ЛД, що залежать від геометрії, режиму течії, що характеризується газодинамічними критеріями подоби ( $M$ ,  $Re$ ) і кута атаки;
- втрати енергії від протечок через ущільнення РК, що залежать від геометрії ущільнення (величини зазору, діаметра ущільнення і т.д.) і режиму роботи ВЦН;
- втрати енергії в поворотному коліні.

На розробку методу газодинамічного розрахунку течії газу також накладають свої обмеження умови експлуатації. До цих обмежень відносяться:

- обмежена номенклатура вимірюваних параметрів ВЦН (відсутність виміру потужності, продуктивності);

- значні систематичні і випадкові похибки каналів виміру параметрів ВЦН (до декількох відсотків від шкали виміру);
- необхідність визначення фактичних параметрів режиму роботи ВЦН у масштабі реального часу з інтервалом кілька секунд.

Наведені особливості обумовлюють розробку методу визначення фактичних характеристик і параметрів режиму роботи ВЦН на основі газодинамічного розрахунку параметрів проточної частини в одномірній постановці. Запропонований метод ґрунтується на використанні рівнянь газової динаміки стосовно до течії газу через проточну частину ВЦН [35, 39, 47, 50, 52, 54] і обліку втрат в елементах проточної частини за допомогою відповідних коефіцієнтів втрат [47, 50].

Даний метод передбачає розв’язання двох завдань.

Перше завдання полягає у визначенні коефіцієнтів втрат у РК і ЛД із використанням паспортних характеристик на основі газодинамічного розрахунку проточної частини. Задача вирішується однократно для кожного типу ВЦН. У випадку зміни геометрії проточної частини нагнітача, коефіцієнти втрат перераховуються.

Друге завдання полягає у визначенні зазору в ущільненні покривного диска й обчисленні фактичних характеристик ВЦН за вимірюваними параметрами ВЦН з використанням розрахованих коефіцієнтів втрат на основі газодинамічного розрахунку. Дана задача вирішується періодично по кожному конкретному ВЦН. У якості вхідної оперативної інформації використовують інформацію штатних каналів виміру агрегатної автоматики, вона може бути також застосована для обробки результатів теплотехнічних випробувань.

Фактичні функціональні параметри режиму роботи ВЦН визначають на основі поправок до наступних параметрів: витрати компримованого газу, ККД і потужності, розрахованих за даними випробувань або паспортними характеристиками ВЦН. Поправки визначають, як різниця зазначених параметрів, розрахованих з використанням газодинамічного розрахунку



проточної частини ВЦН при номінальному й фактичному значенні зазору в ущільненні покривного диска.

### Газодинамічний розрахунок проточної частини ВЦН

Процедура газодинамічного розрахунку, використана в наведених вище двох задачах, складається з послідовного визначення параметрів потоку в розрахункових перерізах для елементів проточної частини – вхідного направляючого апарату, РК і ЛД.

На рис. 2.1 наведене положення розрахункових перерізів проточної частини:

- 0 – 0 – за вхідним направляючим апаратом (ВНА),
- 1 – 1 – на вході в РК ВЦН,
- 2 – 2 – на виході з РК,
- 3 – 3 – на вході в ЛД,
- 4 – 4 – на виході з ЛД.

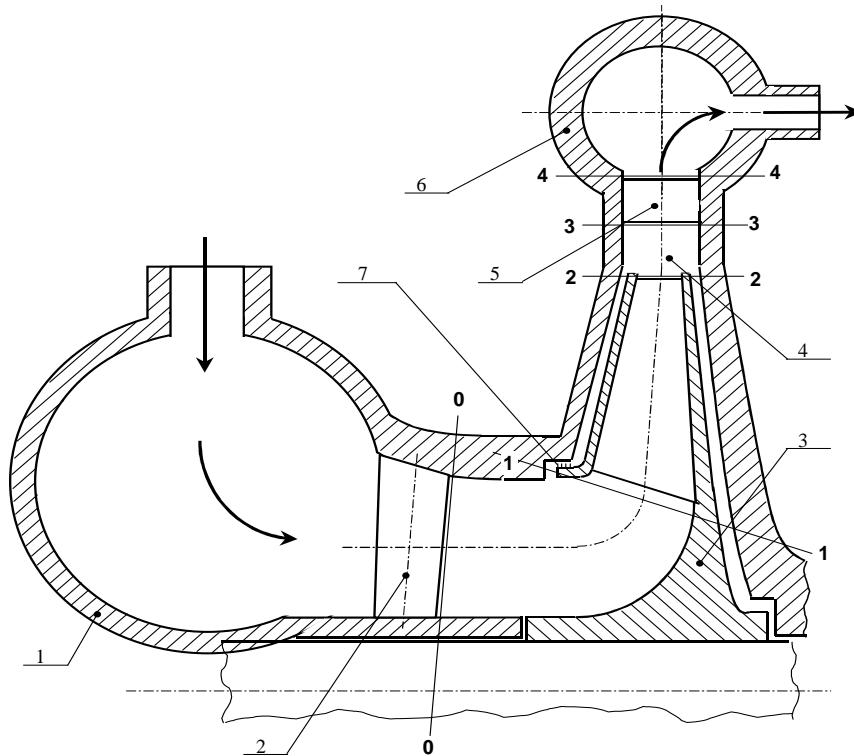


Рис. 2.1 - Схема ступені відцентрового нагнітатеча

- 1 – вхідна кільцева камера, 2 – вхідний направляючий апарат, 3 – робоче колесо, 4 – безлопаточний дифузор, 5 – лопаточний дифузор, 6 – збірна камера, 7 – ущільнення покривного диска

Для визначення параметрів використовують основні рівняння газодинаміки: збереження маси (рівняння нерозривності), збереження кількості руху, збереження моменту кількості руху і збереження енергії. Рівняння одновимірної стаціонарної течії ідеального газу в каналі проточної частини, обмеженому двома розрахунковими перерізами, мають такий вигляд. Рівняння збереження маси

$$\rho_{вх} F_{вх} C_{вх} = \rho_{вых} F_{вых} C_{вых}, \quad (2.1)$$

де  $\rho_{вх}$ ,  $\rho_{вых}$  – густина газу відповідно на вході й виході каналу проточної частини, обмеженого розрахунковими перерізами (рис. 3.1);

$C_{вх}$ ,  $C_{вых}$  – швидкості потоку відповідно на вході і виході каналу проточної частини, обмеженого розрахунковими перерізами;

$F_{вх}$ ,  $F_{вых}$  – площа розрахункових перерізів, що обмежують канал.

Рівняння збереження кількості руху

$$G_{вх} C_{вх} = G_{вых} C_{вых}, \quad (2.2)$$

де  $G_{вх}$ ,  $G_{вых}$  – секундна витрата газу відповідно на вході і виході каналу проточної частини, обмеженого розрахунковими перерізами (рис. 2.1).

Рівняння збереження моменту кількості руху

$$G_{вх} C_{и вх} D_{вх} = G_{вых} C_{и вых} D_{вых}, \quad (2.3)$$

де  $D_{вх}$ ,  $D_{вых}$  – середні діаметри розрахункових перерізів на вході і виході каналу проточної частини.

Рівняння збереження енергії

$$i_{вх} + \frac{C_{вх}^2}{2} = i_{вых} + \frac{C_{вых}^2}{2}, \quad (2.4)$$

де  $i_{вх}$ ,  $i_{вых}$  – ентальпії потоку газу відповідно на вході і виході каналу проточної частини, обмеженому розрахунковими перерізами (рис.3.1).

Для замикання наведеної системи рівнянь використовують процедуру визначення термодинамічних параметрів природного газу, засновану на модифікованому рівнянні "Бенедикта-Вебба-Рабіна" і використанні  $I$ - $S$  діаграми. Дана процедура дозволяє розрахувати таблицю термодинамічних властивостей

газу за відомим складом природного газу в області робочих значень тиску і температури газу.

Газодинамічний розрахунок виконують на основі відомих геометричних параметрів проточної частини. На рис. 2.2 подана кінематична схема потоку газу у відцентровій ступені з позначеннями характерних геометричних параметрів і швидкостей потоку. На рис. 2.3 відображено робочий процес стискання газу в відцентровій ступені в  $I-S$  діаграмі.

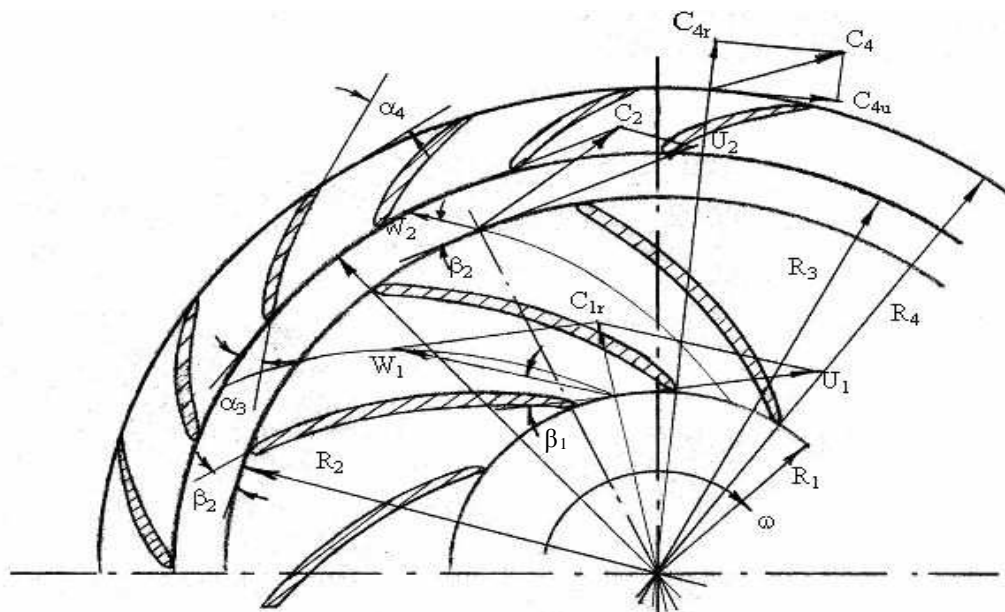


Рис.3.2 – Кінематична схема потоку газу у відцентровій ступені:

- $\alpha_3$  – кут входу потоку на ЛД,
- $\alpha_4$  – кут виходу потоку з ЛД,
- $\beta_1$  – кут входу потоку на РК у відносному русі,
- $\beta_2$  – кут виходу потоку з РК у відносному русі,
- $C_{1r}$  – радіальна складова абсолютної швидкості входу потоку на РК,
- $C_2$  – абсолютна швидкість виходу потоку з РК,
- $C_4$  – швидкість виходу потоку з ЛД,
- $C_{4u}$  – окружна складова швидкості виходу потоку з ЛД,
- $C_{4r}$  – радіальна складова абсолютної швидкості виходу потоку з ЛД,
- $U_1$  – переносна швидкість потоку на вході в РК,
- $U_2$  – переносна швидкість потоку на виході з РК,
- $W_1$  – швидкість входу потоку на РК у відносному русі,
- $W_2$  – швидкість виходу потоку з РК у відносному русі,
- $R_1$  – середній радіус каналу проточної частини на вході в РК,
- $R_2$  – середній радіус каналу проточної частини на виході з РК,
- $R_3$  – середній радіус каналу проточної частини на вході в ЛД,
- $R_4$  – середній радіус каналу проточної частини на виході з ЛД,
- $\omega$  – кутова швидкість РК.

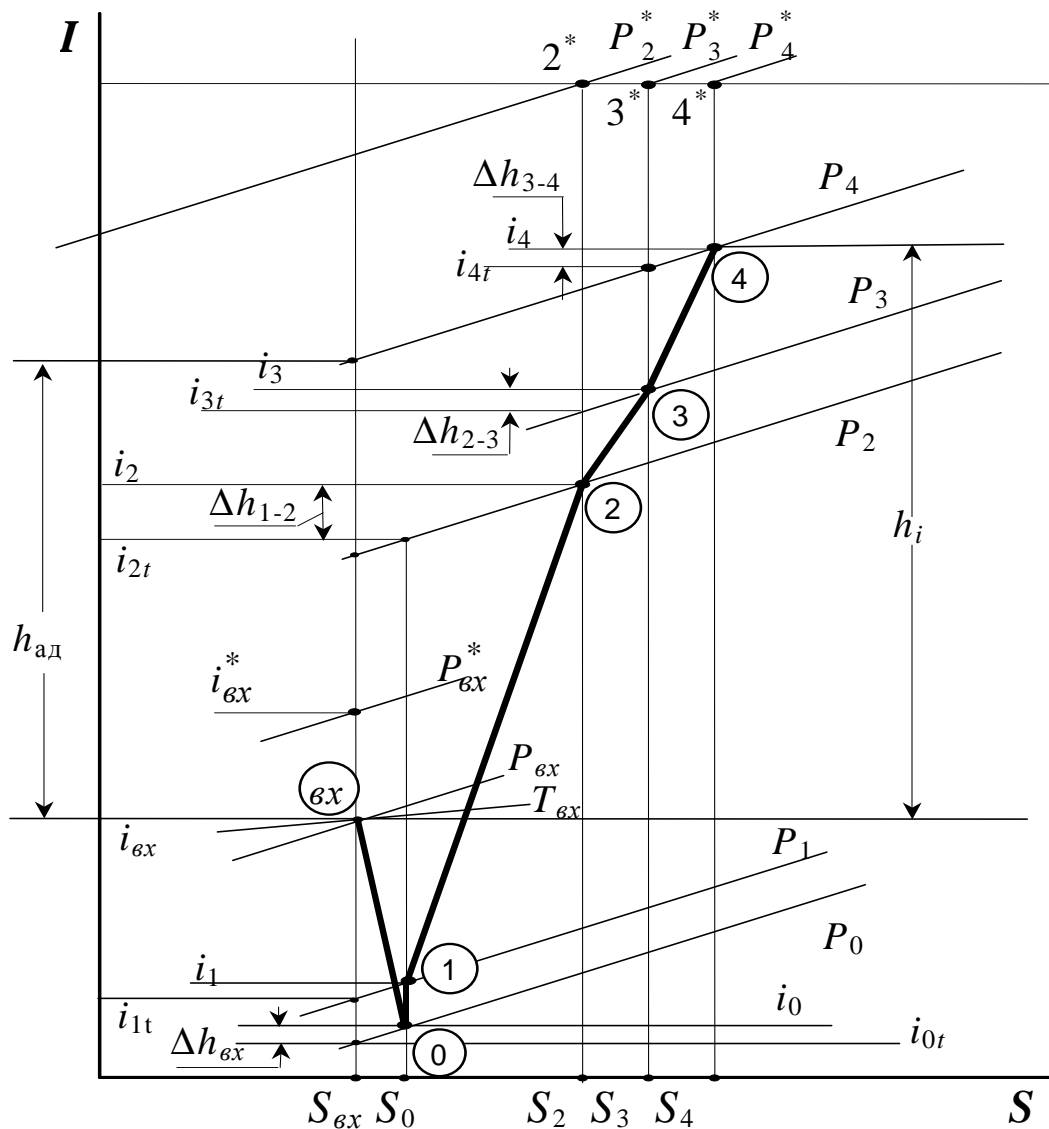


Рис.2.3 - Процес стиснення газу у відцентровому ступені ВЦН в  $I - S$  діаграмі

Послідовність газодинамічного розрахунку наведена нижче.

*Розрахунок вхідного направляючого апарату*

1. Використовуючи процедуру розрахунку термодинамічних параметрів (надалі процедура  $I - S$ ), визначають ентальпію  $i_{\text{вх}}$  і ентропію  $S_{\text{вх}}$  потоку газу на вході до ВНА за тиском  $P_{\text{вх}}$  і температурою газу  $T_{\text{вх}}$  на вході до ВЦН.

2. Як початкове наближення приймаються значення тиску газу за ВНА, що дорівнює  $P_0 = 0,7 \cdot P_{\text{вх}}$ . За допомогою процедури  $I - S$  визначають температура  $T_{0t}$  і теоретичне значення ентальпії потоку газу  $i_{0t}$  за ВНА на основі значень тиску  $P_0$  і ентропії  $S_{\text{вх}}$ .

3. Значення коефіцієнта швидкості вхідного направляючого апарату приймається  $\varphi_0 = 0,97$ .

4. Втрати в ВНА визначають, як

$$\Delta h_0 = (1 - \varphi_0^2) \cdot (i_{ex} - i_{0t}). \quad (2.5)$$

5. Ентальпія потоку газу за ВНА дорівнює

$$i_0 = i_{0t} + \Delta h_0. \quad (2.6)$$

6. Швидкість газу на виході з ВНА визначають, як

$$C_0 = \varphi_0 \cdot \sqrt{2 \cdot (i_{ex} - i_{0t})}. \quad (2.7)$$

7. Визначають температуру газу за вхідним направляючим апаратом  $T_0$  за значеннями тиску  $P_0$  і ентальпії  $i_0$  на основі  $I - S$  процедури.

8. Визначають коефіцієнт стисливості  $Z_0$  за значеннями тиску  $P_0$  і температури газу  $T_0$  на основі рівняння стану "Бенедикта-Вебба-Рабіна".

9. Визначають густину газу за ВНА за формулою

$$\rho_0 = \frac{P_0}{Z_0 \cdot R \cdot T_0}. \quad (2.8)$$

10. Розраховують витрати газу в перерізі 0 – 0

$$G_0 = C_0 \cdot \rho_0 \cdot \pi \cdot D_0 \cdot L_0 \cdot \sin \alpha_0, \quad (2.9)$$

де  $D_0$  – середній діаметр каналу проточної частини на виході з ВНА,

$L_0$  – довжина лопаток на виході ВНА,

$\alpha_0$  – кут виходу потоку з ВНА.

11. Колова складова швидкості потоку газу за ВНА дорівнює

$$C_{0u} = C_0 \cdot \cos \alpha_0. \quad (2.10)$$

Розрахунок параметрів потоку газу перед робочим колесом

1. Визначають окружну складову швидкості потоку

$$C_{1u} = C_{0u} \cdot R_1 / R_0, \quad (2.11)$$

де  $R_0$  і  $R_1$  – середні радіуси каналів проточної частини ВЦН у перерізах 0 – 0 і 1 – 1.

2. Переносна швидкість обертання РК дорівнює

$$U_1 = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60}, \quad (2.12)$$

де  $D_1$  – середній діаметр каналу проточної частини на вході РК.

3. Переносну швидкість обертання РК у перерізі 2 – 2 визначають за формулою

$$U_2 = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n}{60}, \quad (2.13)$$

де  $n$  – частота обертання ротора ВЦН.

4. Витрата протікання газу через ущільнення покривного диска

$$\Delta G_{ym} = \pi \cdot \mu \cdot D_{ynl} \cdot \Delta_{ynl} \cdot \rho_1 \cdot \sqrt{\frac{0,75 \cdot (U_2^2 - U_1^2)}{Z_{yc}}}, \quad (2.14)$$

де  $\mu = 0,75$  – коефіцієнт витрати;

$D_{ynl}$  – діаметр ущільнення;

$\Delta_{ynl}$  – зазор ущільнення;

$\rho_1$  – густина газу в перерізі 1 – 1 (приймається рівною  $\rho_0$ );

$Z_{yc}$  – кількість вусиків в ущільненні покривного диска.

5. Значення осьової складової швидкості в перерізі 1 - 1 виходячи з рівняння нерозривності  $G_1 = G_0 + \Delta G_{ym}$

$$C_{1z} = \frac{G_1}{\rho_0 \pi \cdot D_1 \cdot L_1}. \quad (2.15)$$

де  $D_1$  – середній діаметр каналу проточної частини на вході в РК,

$L_1$  – довжина лопаток на вході в РК.

6. Абсолютну швидкість руху потоку газу  $C_1$  визначають за формулою

$$C_1 = \sqrt{C_{1z}^2 + C_{1U}^2}. \quad (2.16)$$

5. Ентальпію газу перед РК  $i_1$  в перерізі 1 – 1 визначають з рівняння енергії

$$i_0 + \frac{C_0^2}{2} = i_1 + \frac{C_1^2}{2}. \quad (2.17)$$

6. Виходячи з припущення про ізоентропний процес течії газу на відріжку між перерізами 1 – 1 і 0 – 0, за значеннями ентальпії  $i_1$  і ентропії  $S_0$  використовуючи  $I - S$  процедуру визначають тиск  $P_1$  і температуру газу  $T_1$  перед РК.

7. Відносна швидкість входу потоку в РК дорівнює

$$w_1 = \sqrt{(C_{1z}^2 + U_1^2)}, \quad (2.18)$$

де  $U_1$  – переносна швидкість РК на середньому радіусі каналу проточної частини на вході в РК.

8. Кут входу потоку в РК у відносному русі дорівнюється

$$\beta_1 = \arctg\left(\frac{C_{1z}}{U_1}\right). \quad (2.19)$$

Розрахунок параметрів потоку на виході з робочого колеса

1. В якості початкового наближення значенню тиску газу за РК  $P_2$  присвоюється значення  $P_1$ . За тиском газу  $P_2$  та ентропією  $S_0$  за допомогою процедури  $I - S$  визначають теоретичні параметри потоку газу за РК  $i_{2t}$  і  $T_{2t}$ .

2. Теоретична відносна швидкість потоку газу на виході з РК

$$w_{2t} = \sqrt{(w_1^2 + U_2^2 - U_1^2 - 2 \cdot (i_{2t} - i_1))}. \quad (2.20)$$

3. Відносна швидкість потоку на виході з РК

$$w_2 = \psi \cdot w_{2t}, \quad (2.21)$$

де  $\psi = \sqrt{1 - \zeta_{pk}^2}$  – коефіцієнт швидкості РК;

$\zeta_{pk}$  – коефіцієнт втрат в РК.

Значення коефіцієнта втрат в РК  $\zeta_{pk}$  визначають на основі експериментальних даних при незношеному стані відцентрового нагнітача на основі методу, що приведений в розділі 3.1.3.

4. Проекції швидкості потоку  $w_2$  на радіальний і коловий напрям дорівнюють

$$w_{2r} = w_2 \cdot \sin(\beta_{2l}), \quad (2.22)$$

$$w_{2u} = w_2 \cdot \cos \beta_{2l} + \Delta w_u, \quad (2.23)$$

де  $\Delta w_u = 1,2 \cdot \pi \cdot U_2 \cdot \frac{\sin \beta_{2l}}{Z_{l2}}$  – поправка, що враховує відхилення потоку за РК,

$\beta_{2l}$  – кут виходу потоку газу з РК,

$Z_{l2}$  – кількість лопаток в РК.

5. Втрати енергії потоку в РК складають

$$\Delta h_2 = (1 - \psi^2) \cdot \frac{w_1^2}{2}. \quad (2.24)$$

6. Ентальпія потоку за РК дорівнює

$$i_2 = i_{2t} + \Delta h_2. \quad (3.25)$$

7. Визначають температура газу  $T_2$  за РК за значеннями тиску  $P_2$  і ентальпії  $i_2$  на основі  $I - S$  процедури.

8. Визначають коефіцієнт стиснення  $Z_2$  за РК за значеннями тиску  $P_2$  і температури газу  $T_2$  на підставі рівняння стану "Бенедикта-Вебба-Рабіна".

9. Визначається густина газу за РК за формулою

$$\rho_2 = \frac{P_2}{Z_2 \cdot R \cdot T_2}. \quad (2.26)$$

10. З рівняння нерозривності визначають витрата газу на виході РК

$$G_2 = \rho_2 \cdot w_{2r} \cdot \pi \cdot D_2 \cdot L_2. \quad (2.27)$$

де  $D_2$  – середній діаметр каналу проточної частини на виході з РК

$L_2$  – довжина лопаток РК.

11. Розрахунок параметрів потоку газу на виході РК відповідно до п.1-11 повторюється доки не співпадуть значення витрати газу в перерізі 2 - 2 і витрати газу в перерізі 1 - 1 з необхідною точністю шляхом варіації значень тиску газу  $P_2$ .

Розрахунок параметрів потоку на виході робочого колеса закінчується за умови рівності  $G_2 = G_1$  з деякою наперед заданною похибкою.

Розрахунок параметрів потоку на ділянці між робочим колесом і лопаточним дифузором.

1. Після визначення параметрів потоку газу за РК (тиску  $P_2$ , температури  $T_2$  і ентальпії  $i_2$ ) визначають абсолютна швидкість виходу потоку з РК

$$C_2 = \sqrt{w_2^2 + U_2^2 - 2 \cdot w_2 \cdot U_2 \cdot \cos \beta_2}, \quad (2.28)$$

і проекції швидкості на радіальний  $C_{2r}$  і коловий  $C_{2u}$  напрям

$$C_{2r} = w_2 \cdot \sin \beta_2, \quad (2.29)$$

$$C_{2u} = w_{2u} - U_2. \quad (2.30)$$

де  $\beta_2$  – кут виходу потоку з РК,

2. Витрати газу через ЛД дорівнюють

$$G_3 = G_2 - \Delta G_{ym}. \quad (2.31)$$

3. Визначають ентропію  $S_2$  і питомий об'єм газу  $v_2$  за значеннями тиску  $P_2$  і ентальпії  $i_2$  на підставі  $I - S$  процедури.

4. Визначають густину газу в перерізі 2 – 2 за формулою

$$\rho_2 = \frac{1}{v_2}. \quad (2.32)$$



Розрахунок параметрів в лопаточному дифузори

1. Радіальну складову швидкості потоку  $C_{3r}$  визначають за формулою

$$C_{3r} = \frac{G_3}{\rho_2 \cdot L_3 \cdot \pi \cdot D_3}, \quad (2.33)$$

де  $D_3$  – середній діаметр каналу проточної частини на вході в ЛД;

$L_3$  – довжина лопаток на вході в ЛД;

2. Колову складову швидкості  $C_{3u}$  розраховують як

$$C_{3u} = \frac{C_{2u} \cdot R_2}{R_3}, \quad (2.34)$$

де  $R_3$  – середній радіус каналу проточної частини в перерізі 3 – 3.

3. Величина абсолютної швидкості потоку на вході в ЛД дорівнює

$$C_3 = \varphi \cdot \sqrt{C_{3r}^2 + C_{3u}^2}, \quad (2.35)$$

де  $\varphi = \sqrt{1 - \zeta_{л\partial}^2}$  – коефіцієнт швидкості ЛД,  $\zeta_{л\partial}$  – коефіцієнт втрат в ЛД.

Значення коефіцієнта втрат в ЛД  $\zeta_{л\partial}$  визначають на підставі експериментальних даних при незношеному стані відцентрового нагнітача на основі методу, що наведений далі.

4. Визначають величину ентальпії потоку газу  $i_3$  в перерізі 3 – 3

$$i_3 = i_2 + \frac{C_2^2 - C_3^2}{2} + (1 - \varphi^2) \cdot \frac{C_3^2}{2}. \quad (2.36)$$

5. Виходячи з припущення про ізоентропний процес течії газу на ділянці між перерізами 3 – 3 і 2 – 2, за значеннями ентальпії  $i_3$  і ентропії  $S_3$  за допомогою  $I - S$  процедури визначають тиск  $P_3$  і температура газу  $T_3$ .

6. Як початкове наближення значенню тиску газу на виході ЛД  $P_4$  присвоюють значення  $P_3$ .

7. За тиском газу  $P_4$  і ентропії  $S_3$  за допомогою процедури  $I - S$  визначають теоретичні параметри потоку газу  $i_{4t}$  і  $T_{4t}$ .

8. Виходячи з рівняння збереження енергії

$$i_3 + \frac{C_3^2}{2} = i_{4t} + \frac{C_{4t}^2}{2} \quad (2.37)$$

визначають теоретичну швидкість потоку газу на виході ЛД.

$$C_{4t} = \sqrt{C_3^2 + 2 \cdot (i_3 - i_{4t})}. \quad (2.38)$$

9. Швидкість потоку на виході ЛД дорівнює

$$C_4 = \varphi \cdot C_{4t}. \quad (2.39)$$

10. Втрати енергії в ЛД складають

$$\Delta h_{\text{д}} = (1 - \varphi^2) \cdot (i_{4t} - i_3). \quad (2.40)$$

11. Ентальпія потоку на виході ЛД дорівнюється

$$i_4 = i_{4t} + \Delta h_{\text{д}}. \quad (2.41)$$

12. За допомогою  $I - S$  процедури визначають температура газу  $T_4$  і ентропія  $S_4$  на виході ЛД за значеннями тиску газу  $P_4$  і ентальпії  $i_4$ .

13. За значенням тиску  $P_4$  і температурі газу  $T_4$  на виході ЛД визначають коефіцієнт стисливості  $Z_4$  на основі рівняння стану "Бенедикта-Вебба-Рабіна".

14. Густина газу на виході ЛД визначають як

$$\rho_4 = \frac{P_4}{Z_4 \cdot R \cdot T_4}. \quad (2.42)$$

15. Проекції швидкості потоку газу на виході ЛД на окружний і радіальний напрям дорівнюють

$$\begin{aligned} C_{4r} &= C_4 \cdot \sin \alpha_4, \\ C_{4u} &= C_4 \cdot \cos \alpha_4, \end{aligned} \quad (2.43)$$

де  $\alpha_4$  – кут виходу потоку з ЛД.

16. Витрати газу на виході ЛД дорівнюють

$$G_4 = G_3 - \Delta G_{\text{ym}} \cdot \frac{G_2}{G_0}. \quad (2.44)$$

17. Розрахунок параметрів потоку газу на виході ЛД відповідно до п.6 ÷ 17 повторюють до співпадання значення витрат газу на виході ЛД зі значенням різності  $G_2 - \Delta G_{\text{ym}}$  з вимагаємою точністю шляхом варіації значень тиску газу  $P_4$ .

18. Розраховується відхилення тиску газу  $P_4$  від тиску газу на виході ВЦН  $P_{\text{вих}}$ .

Якщо відхилення за модулем перевищує припустиму похибку розрахунку, то уточнюють значення тиску газу  $P_0$  і повторюють наведений розрахунок. Ітераційний процес розрахунку завершується, якщо відхилення за модулем менше припустимої похибки розрахунку.

19. Визначають внутрішню потужність ВЦН

$$N_u = G_2 \cdot \left[ i_4 - i_{\text{ex}} + \frac{C_4^2}{2} \right]. \quad (2.45)$$

20. Коефіцієнт корисної дії ВЦН дорівнює

$$\eta_k = \frac{i_{4t} - i_{\text{ex}}}{i_4 - i_{\text{ex}}} \quad (2.46)$$

### ***Облік властивостей реальних газів у газовій суміші при газодинамічному розрахунку***

Газодинамічний розрахунок проводять з урахуванням властивостей реального газу. Для визначення термодинамічних параметрів газу розроблені і використовуються процедури, на основі яких за двома відомими параметрами визначають два інші:

- 1) за заданими  $P, T$  визначають  $i, S$ ;
- 2) за заданими  $T, i$  визначають  $P, S$ ;
- 3) за заданими  $P, i$  визначають  $T, S$ ;
- 4) за заданими  $i, S$  визначають  $P, T$ .

Процедури розроблені на розрахунок термодинамічних параметрів, отриманих шляхом інтерполяції даних таблиць для компонентів природного газу (метан, етан, пропан, вищі вуглеводні, водяна пара, азот, вуглекислий газ) в області робочих значень тиску і температури газу [42].

Як правило, коефіцієнти втрат у РК і ЛД визначають на підставі результатів експериментальних досліджень, отриманих при аеродинамічних

випробуваннях ізольованих ґрат лопаток. Однак, для більшості промислових ВЦН, застосовуваних для транспорту газу, подібні експериментальні дослідження не проводяться.

З метою вирішення задачі визначення коефіцієнтів втрат без проведення аеродинамічних випробувань розроблений метод, що описаний нижче. Даний метод припускає вирішення задачі визначення коефіцієнтів втрат в два етапи.

На першому етапі визначають величини базових коефіцієнтів втрат в РК  $\zeta_{в\text{рк}}$  і ЛД  $\zeta_{в\text{лд}}$  на номінальному режимі роботи ВЦН. На другому етапі визначають залежність втрат від нерозрахованого кута натікання  $\Delta\beta = \beta_{1\text{расч}} - \beta_1$  в лопатках РК  $\zeta_{i\text{рк}}$  і кута  $\Delta\alpha = \alpha_{3\text{расч}} - \alpha_3$  в лопатках ЛД  $\zeta_{i\text{лд}}$  для всієї області прпустимих режимів роботи ВЦН.

Втрати кінетичної енергії, що виникають від нерозрахованого кута натікання  $\zeta_{i\text{рк}}$  і  $\zeta_{i\text{лд}}$ , пов'язані з відривом потоку від вхідних кромek, частковим заповненням межлопаточного каналу і наступним розширенням потоку. Можливі різні підходи до визначення відзначених втрат. У випадку тонких вхідних крайок втрати відриву можуть бути визначені аналогічно втратам при раптовій зміні перерізу труби або втратам у коліні [21]. Теоретичний розгляд плоскої течії ідеальної нестисливої рідини через ґрати з довгих нескінченних-тонких пластин показує, що в цьому випадку втрати відриву дорівнюють кінетичній енергії, визначеній за різницею  $w$  вектору швидкості потоку на вході в ґрати і вектора швидкості  $w_1$  після повороту потоку в розрахунковому напрямку  $\beta_{1\text{расч}}$ . Теоретичний коефіцієнт втрат від нерозрахованого кута натікання відповідно до [50] дорівнює

$$\zeta_i = \left( \frac{\Delta w}{w_1} \right)^2 = \left( \frac{\sin \Delta \beta}{\sin \beta_{1\text{расч}}} \right)^2. \quad (2.47)$$

Крім зазначеної залежності (2.47) у роботах [35, 39, 47] пропонувано формульні залежності і результати експериментальних досліджень для визначення коефіцієнтів втрат від нерозрахованого кута натікання потоку.

У роботах [35, 47] пропоновано графічні залежності для визначення величини втрат від нерозрахованого кута натікання. У роботі [39] розглянуто залежність

$$\zeta_{отн} = \frac{\alpha_i}{(\beta_{1L} / \beta_2) \cdot (\beta_1 + \beta_2)}, \quad (2.48)$$

де  $\zeta_{отн}$  – відносний параметр для визначення коефіцієнта втрат  $\zeta_i$ . Коефіцієнт втрат  $\zeta_i$  визначають за відповідними графічними залежностями у функції від  $\zeta_{отн}$ ,

$\beta_{1L}$  – геометричний кут входу потоку,

$\alpha_i$  – кут атаки.

Безпосереднє вирішення задачі визначення втрат від нерозраховуваного кута натікання полягає у виборі однієї з відзначених залежностей і їхніх модифікацій відповідно зі сформульованими нижче критеріями.

Пропонований метод визначення коефіцієнтів втрат містить у собі:

- 1) перетворення в цифровий вид паспортних характеристик ВЦН:
  - витратно-напорної характеристики у вигляді залежності міри стискання від зведеної витрати і зведеної відносної частоти обертів  $\varepsilon = f_1(Q_{np}, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np})$ ;
  - потужносної характеристики у вигляді залежності зведеної потужності від зведеної витрати і зведеної відносної частоти обертання  $N_{np} = f_2(Q_{np}, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np})$ ;
  - ККД характеристики у вигляді залежності ККД від зведеної витрати  $\eta = f_3(Q_{np})$ ;
  - завдання геометричних параметрів за даними заводу виготувача.

2) Розбивку всієї області припустимих режимів ВЦН сіткою з рівномірним кроком по лініях однакової міри стискання і зведеної частоти обертання ротора ВЦН із формуванням вузлів  $\{\varepsilon_l\}$ ,  $l = \overline{0, NE}$

$$\left\{ \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j} \right\}, j = \overline{0, NN}.$$

3) Розрахунок значення функціонала і визначення коефіцієнтів втрат.

Розраховують значення наступного функціонала:

$$F_n = \sum_{l=0, j=0}^{l=NE, j=NN} \left( k_1 \cdot (Q_{np}^p(\zeta_{pk}, \zeta_{ld}, \varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j}) - Q_{np}^{\Pi}(\varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j}))^2 + \right. \\ \left. + k_2 \cdot (\eta_{пол}^p(\zeta_{pk}, \zeta_{ld}, \varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j}) - \eta_{пол}^{\Pi}(\varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j}))^2 + \right. \\ \left. + k_3 \cdot (N_{np}^p(\zeta_{pk}, \zeta_{ld}, \varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j}) - N_{np}^{\Pi}(\varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j}))^2 \right), (2.49)$$

де  $\zeta_{pk}, \zeta_{ld}$  – коефіцієнти втрат, що визначають як

$Q_{np}^{\Pi}(\varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j}), \eta_{пол}^{\Pi}(\varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j}), N_{np}^{\Pi}(\varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j})$  – параметри режиму

роботи ВЦН, що отримані на основі паспортних характеристик ВЦН для вузла сітки з координатами  $l, j$ ,

$Q_{np}^p(\zeta_{pk}, \zeta_{ld}, \varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j}), Q_{np}^p(\zeta_{pk}, \zeta_{ld}, \varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j}), Q_{np}^p(\zeta_{pk}, \zeta_{ld}, \varepsilon_l, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np\ j})$  –

розрахункові значення параметрів режиму роботи ВЦН, отримані на основі газодинамічного розрахунку для вузла сітки з координатами  $l, j$ ,

$k_1, k_2, k_3$  – вагові коефіцієнти.

При мінімізації функціоналу  $F_n$  на номінальному режимі роботи ВЦН коефіцієнти втрат  $\zeta_{pk}, \zeta_{ld}$  визначають значення коефіцієнтів базових втрат  $\zeta_{B\ pk}, \zeta_{B\ ld}$ . На неномінальних режимах ці коефіцієнти визначають значення коефіцієнтів втрат від нерозрахованого кута натікання  $\zeta_{i\ pk}, \zeta_{i\ ld}$ . При цьому коефіцієнти втрат обчислюють за наведеними вище формулами (2.47 ÷ 2.48) з урахуванням можливих модифікацій або за експериментально отриманими графічними залежностями. Обирається та залежність із усіх розглянутих, що

забезпечує мінімальне значення функціонала.

Як підтвердження запропонованого варіанта визначення коефіцієнтів втрат, виконано чисельні розрахунки цих коефіцієнтів для одно-, дво- і триступінчастих ВЦН, отримано графіки розрахункових характеристик ВЦН на основі газодинамічного розрахунку з використанням обчислених коефіцієнтів втрат і проведено порівняння розрахункових характеристик з паспортними.

Для ВЦН ГПА Ц-6,3С/41-1,7, Demag 655 P2 и 520-12-1 значення базових коефіцієнтів втрат склали: 31 %, 22 % и 25 % відповідно. Як показали розрахунки, формульною залежністю для коефіцієнтів втрат від нерозрахованого кута натікання, що забезпечує мінімальне значення функціоналу (2.49) є залежність (2.47), яка запропонована в роботі [50].

Графіки паспортних і розрахункових витратно-напорної і ККД характеристик ВЦН Demag 655 P2 подані на рис. 2.4 ÷ 2.5.

З аналізу графіків, представлених на рис. 2.4 ÷ 2.5, виходить, що максимальне відхилення розрахункових характеристик від паспортних не перебільшує 1,7 %.

Крім зазначених коефіцієнтів втрат у газодинамічному розрахунку враховують втрати, що залежать від числа Рейнольдса і числа Маха, втрати від протечки газу через зазор в ущільненні покривного диска, відхилення кута на виході РК, втрати в поворотному коліні. Облік цих втрат проводять за відомими формульними залежностями або за експериментальними даними, що наведені у [46].

Друге завдання полягає у визначенні величини зміни зазору ущільнень покривного диска і фактичних характеристик на основі обчислених коефіцієнтів втрат за серією вимірів параметрів ВЦН.

Величина зазору розраховують за умови рівності розрахункової температури на виході ВЦН її обмірюваному значенню. Розрахункову температуру визначають у функції від величини зазору і коефіцієнтів втрат для вектору вимірюваних параметрів ВЦН. При виборі області можливої зміни розрахункового значення температури на виході ВЦН використовують спрощення  $I-S$  діаграма процесу стискання газу, яка відображена на рис.2.6. На цьому рисунку наведені також характерні величини тиску і температури газу:

- на вході в ВЦН –  $P_{ex}$  і  $T_{ex}$ ;
- за ВЦН для паспортного значення ККД –  $P_{вых}$  і  $T_{kt}$ ;

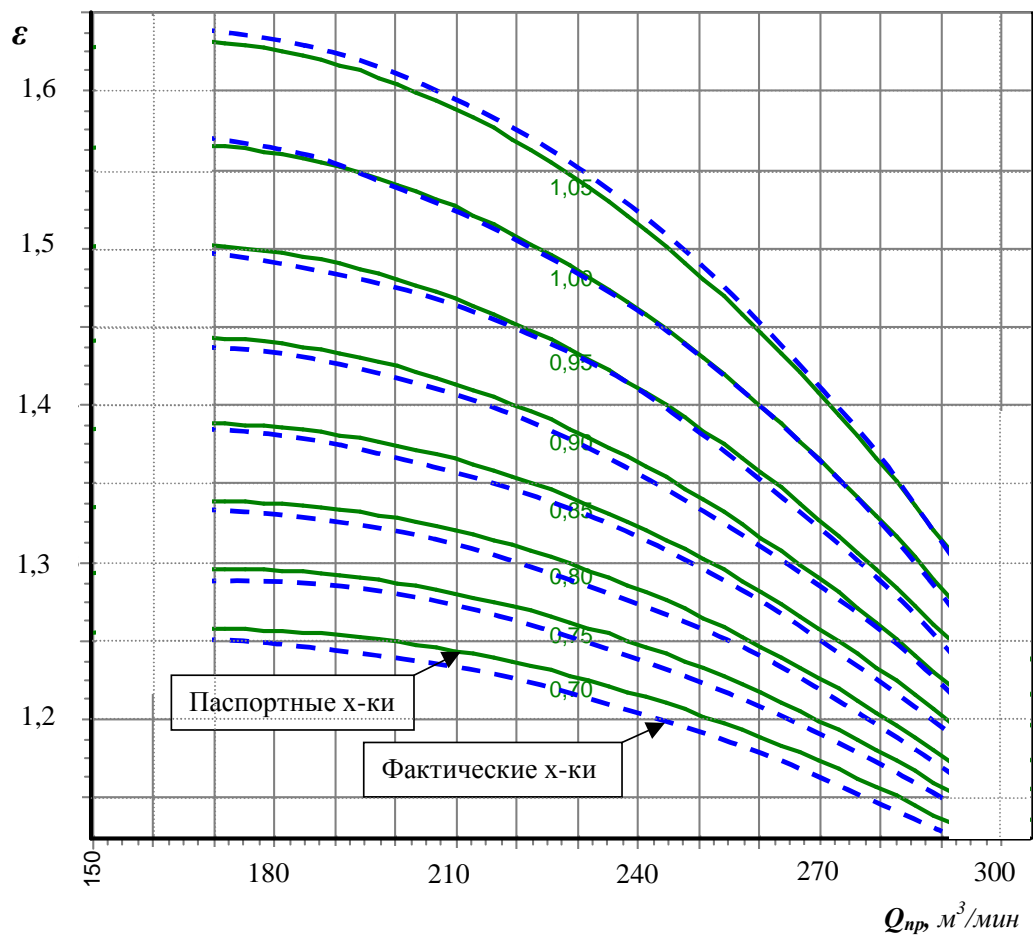


Рис.2.4 – Графіки паспортної і розрахункової витратно-напорних характеристик ВЦН Demag 655 P2

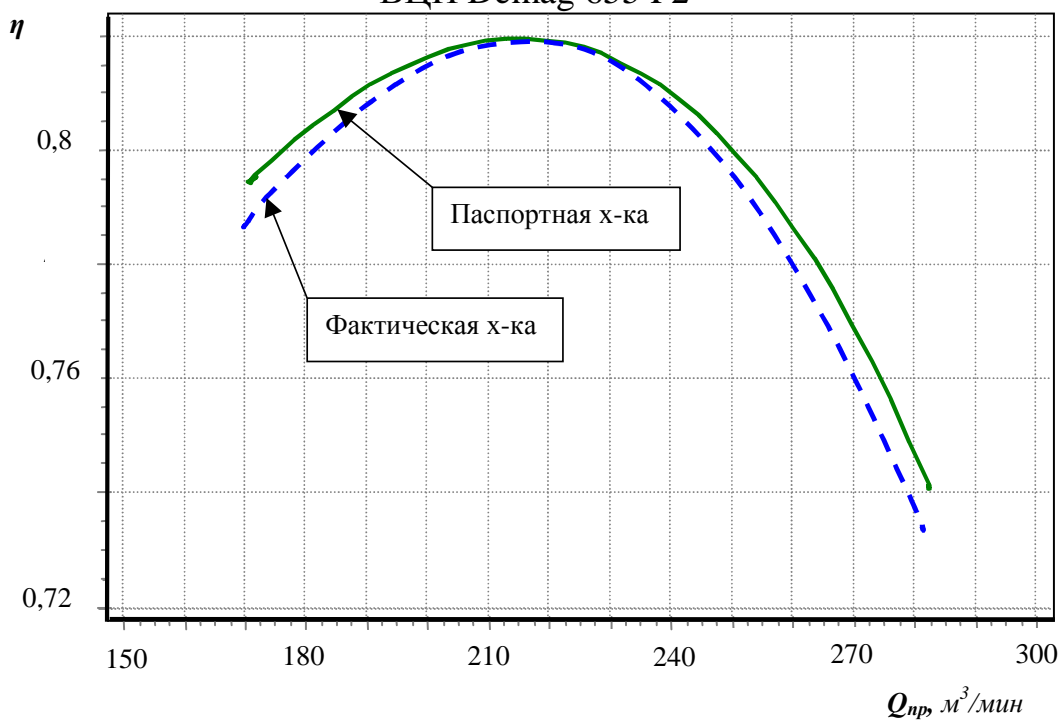


Рис.2.5 – Графік паспортної і розрахункової ККД характеристик ВЦН Demag 655 P2



- за ВЦН для номінального значення зазору в ущільненні покривного диска –  $P_{\text{вих}}$  і  $T_{k \min}$ ;
- за ВЦН для гранично зношеного стану проточної частини на даному режимі роботи –  $P_{\text{вих}}$  і  $T_{k \max}$ . Для визначення  $T_{k \max}$  приймається зниження ККД на 10 ÷ 15 % у порівнянні з відповідним його значенням для незношеного стану;
- на виході ВЦН для стану проточної частини з фактичною ступінню зносу –  $P_{\text{вих}}$  і  $T_{\text{вих}}$ .

Температура  $T_{\text{вих}}$ , що відповідає фактичному стану проточної частини знаходиться між  $T_{k \min}$  і  $T_{k \max}$ .

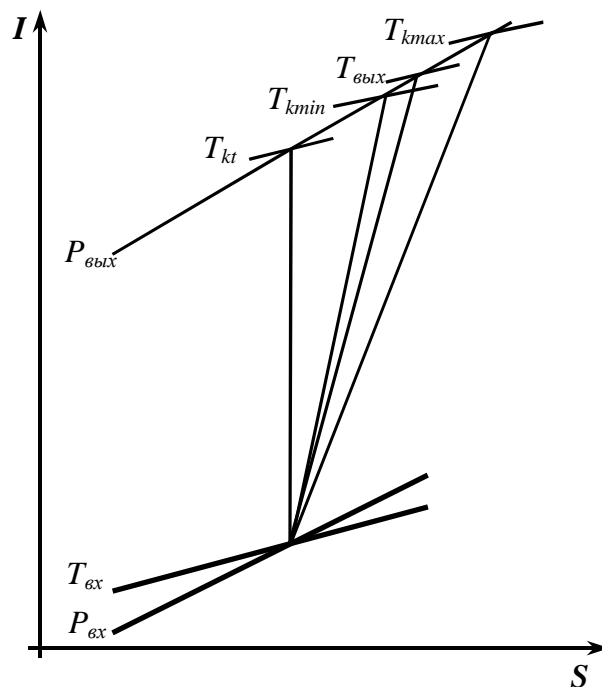


Рис.2.6 – Спрощена  $I$ - $S$  діаграма процесу стискання газу

Фактичні характеристики ВЦН розраховують за обчисленим значенням зазору в ущільненні покривного диска для всієї області припустимих режимів роботи ВЦН  $(Q_{np}, \left[ \frac{n}{n_n} \right]_{np})$  за допомогою процедури газодинамічного розрахунку проточної частини.

### ***Розрахунок коефіцієнтів втрат енергії в різних елементах проточної частини відцентрового нагнітача***

Коефіцієнти втрат залежать від числа Рейнольдса і числа Маха, втрат від протікання газу через зазор в ущільненні покривного диска, відхилення кута на виході РК, втрат у поворотному коліні.

Втрати при течії газу через канали, що утворені лопатками РК і ЛД, визначають на підставі наступної залежності

$$\begin{aligned}\zeta_{PK} &= (\zeta_{B PK} + \zeta_{Re} + \zeta_{i PK}) \cdot K_M \\ \zeta_{LD} &= (\zeta_{B LD} + \zeta_{Re} + \zeta_{i LD}) \cdot K_M\end{aligned}\quad (2.50)$$

де  $\zeta_{B PK}, \zeta_{B LD}$  – базові коефіцієнти втрат у РК і ЛД, що відповідають випадку течії при автомодельному числі Рейнольдса, числі Маха  $M \leq 0,35$  і ненаголошеному натіканні потоку газу на лопатки,

$\zeta_{Re}$  – величини коефіцієнтів втрат, що враховує вплив числа  $Re$  в діапазоні  $Re < Re_{авт}$ ,

$\zeta_{i PK}, \zeta_{i LD}$  – величини коефіцієнтів втрат у РК і ЛД, що враховують вплив нерозраховуваного кута натікання потоку газу,

$K_M$  – функція, що враховує вплив числа Маху в діапазоні  $M > 0,35$ .

Вплив числа Рейнольдса враховують відповідно до експериментальних даних [21, 47, 50]. При числах  $Re < 3 \cdot 10^5$  спостерігається помітне зниження ККД відцентрової ступені, причому точка максимального ККД зміщується в область менших значень коефіцієнта витрати. Вплив цього фактору враховують за допомогою наступної залежності [21]

$$\zeta_{Re} = \frac{\zeta_{Re_{авт}}}{\zeta_{Re_{авт}} + (1 - \zeta_{Re_{авт}}) \cdot \left(\frac{Re}{Re_{авт}}\right)^m}, \quad (2.51)$$

де  $Re_{авт}$  – автомодельне значення числа  $Re$ ,

$\zeta_{Re_{авт}}$  – коефіцієнт втрат при автомодельному значенні числа  $Re$ ,

$m$  – показник степені у функції від числа  $Re$ .

З огляду на те, що потік у ВЦН практично завжди турбулентний, при оцінці в'язкості слід виходити з ефективного значення числа  $Re^* = \phi_T Re$ , де  $\phi_T$  – фактор турбулентності. Величина фактору турбулентності для ВЦН розглядаємого типу  $\phi_T \approx 1,5 \div 3,5$  [50].

Врахування впливу числа Маха на втрати в ґратах ґрунтується на експериментальних даних, що можуть бути узагальнені наступною залежністю

$$K_M = 1 + 5 \cdot (M_{\max} - 0,35)^{3,5}, \quad (2.52)$$

де  $M_{\max}$  – максимальне місцеве число Маха на режимі, що розраховують, і яке визначають відповідно до рекомендацій [21]. При числах Маха менших 0,35 поправочний коефіцієнт впливу числа Маха  $K_M = 1$ .

Визначення втрат від протікання робочого тіла через ущільнення покривного диска пов'язано з обчисленням параметрів газу безпосередньо перед ущільненням і перепаду тиску перед і за РК.

Величину протікання визначають відповідно до рекомендацій [50] за формулою (2.14). Відповідно до (2.14) розраховані протічки робочого тіла для ВЦН ГПА Ц-6,3С/41-1,7, Demag 655 P2 і 520-12-1. Відносні величини втрат від

протічок  $\frac{\Delta G_{ум}}{G_{сек}}$  склали: 0,3 ÷ 1,4 %, 0,75 ÷ 2,9 % і 0,3 ÷ 0,7 % відповідно для цих

типів ВЦН. При цьому, із зростанням зведеної об'ємної продуктивності величина протічки робочого тіла зменшується.

Урахування відхилення кута потоку газу за РК у наслідок дії кориолисових сил проводять за формулою (2.23).

Для ВЦН ГПА Ц-6,3С/41-1,7, Demag 655 P2 і 520-12-1 кут відхилення потоку залежності від зведеної витрати коливається відповідно від  $-18,4^\circ$  до  $+19,5^\circ$ , от  $-28,7^\circ$  до  $+2,3^\circ$  и от  $-13,75^\circ$  до  $+8^\circ$ .

Облік втрат у поворотному коліні ВЦН здійснюють на основі коефіцієнтів, обраних відповідно до рекомендацій роботи [21]. Так, значення коефіцієнта втрат у поворотному коліні для ВЦН ГПА Ц-6,3С/41-1,7,

Demag 655 P2 дорівнює 0,15. При відсутності поворотного коліна ці втрати дорівнюють нулю.

### **2.3. ВПЛИВ ЗНОСУ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА НА ЙОГО ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНИЙ СТАН**

Визначення залежностей зміни функціональних параметрів ВЦН від ступеня зносу проточної частини ВЦН дозволяє оперативно вирішувати в умовах експлуатації (без використання спеціальних технічних і програмних засобів) наступне завдання: визначення відхилень фактичних характеристик ВЦН від паспортних за обмірюваною величиною зазору в ущільненні покривного диска на агрегаті, розкритому під час ремонту. Для вивірення цього завдання необхідно провести дослідження щодо оцінки впливу зносу радіального ущільнення покривного диска на характеристики ВЦН.

Одним з варіантів дослідження впливу зносу елементів проточної частини ВЦН на фактичні характеристики є проведення експерименту на КС. Але такий шлях дослідження пов'язаний з великими матеріальними витратами і практично не застосовний в умовах експлуатації. У той же час, дані теплотехнічних випробувань ГПА дозволяють оцінити їхній стан лише в дуже вузькій області режимів і не дозволяють одержати загальну картину зміни фактичних характеристик.

Тому, для вирішення відзначеної задачі доцільно проводити дослідження впливу зносу проточної частини ВЦН на основі розробленої газодинамічної моделі з наступним аналізом вірогідності результатів за експериментальними даними.

У даному розділі наведені результати дослідження оцінки впливу зносу ущільнення покривного диска на фактичні характеристики ВЦН.

Як об'єкт для дослідження впливу зносу ущільнення покривного диска, обрані ВЦН: ТКР-11, одноступінчастий ВЦН 520-12-1, і багатоступінчасті Demag 655 P2, Н-650-21-2, НЦ 1-16С/76-1,44 і Ц 6,3С/41-1,7. При визначенні цього впливу для агрегату ТКР-11 проведені три розрахунки з наступними величинами зазорів  $\delta$ :

- розрахунок 1:  $\delta = 0,5 \text{ мм}$  – відповідає номінальним значенням зазорів, тобто відображує стан ущільнень у незношеного ВЦН;
- розрахунок 2:  $\delta = 1,0 \text{ мм}$  – середній ступінь зносу ущільнень;
- розрахунок 3:  $\delta = 1,5 \text{ мм}$  – високий ступінь зносу ущільнень.

На рис.2.7 наведені витратно-напірні характеристики ВЦН для зазначених варіантів розрахунку. Ці характеристики визначені функцією міри стискання від секундної витрати компримованого газу і відносної частоти обертів ротора ВЦН:

$$\bar{n} = \frac{n}{n_{\text{ном}}} \quad (2.53)$$

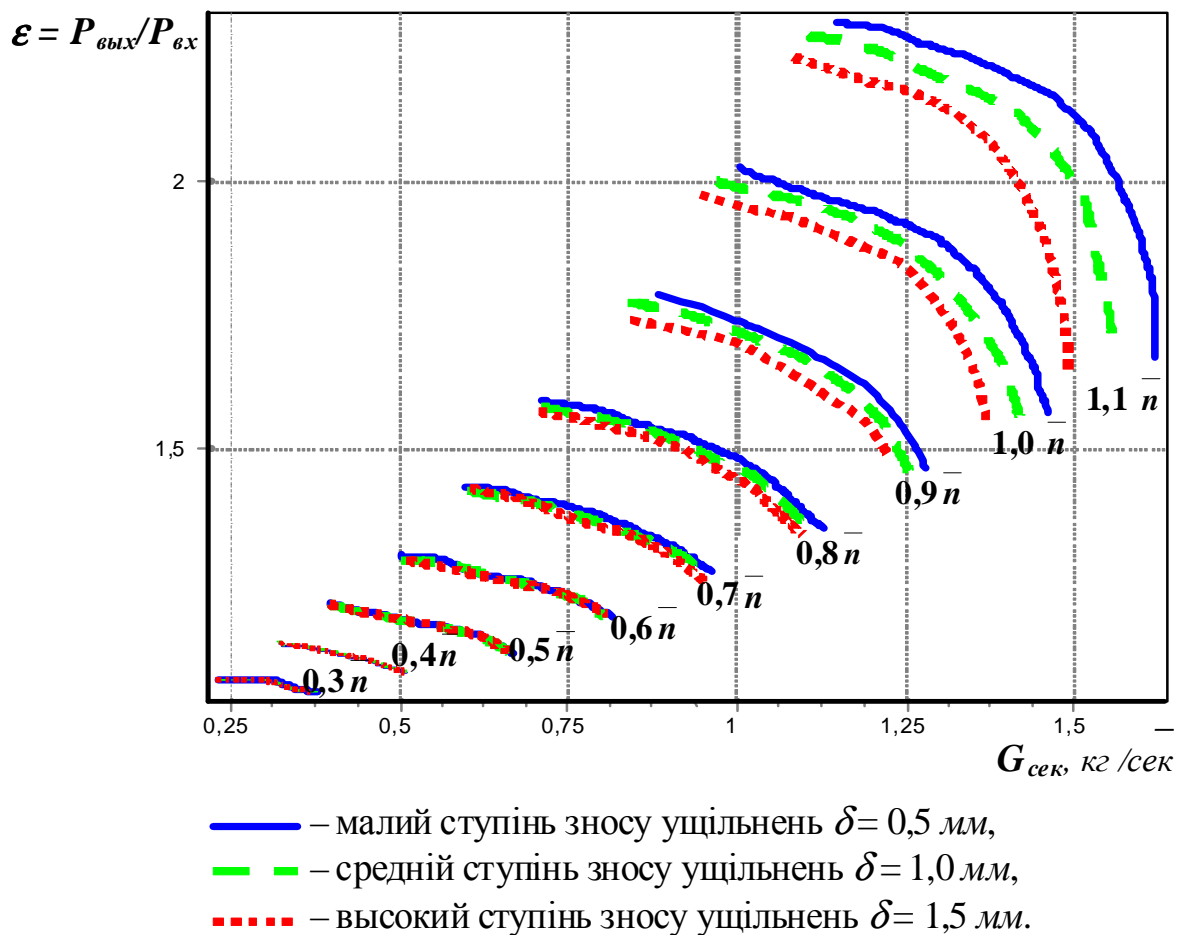


Рис.2.7 – Витратно-напірна характеристика ВЦН ТКР-11 для трьох ступенів зносу ущільнень

На рисунку 2.8 наведена зміна ККД-характеристики ВЦН для варіантів розрахунку. Як видно з рисунка, з ростом зазору відбувається збільшення протічок компримованого газу і зниження ККД. Величина відносного зниження ККД складає від 5 до 15 % у залежності від частоти обертання ротора і міри зносу ущільнення.

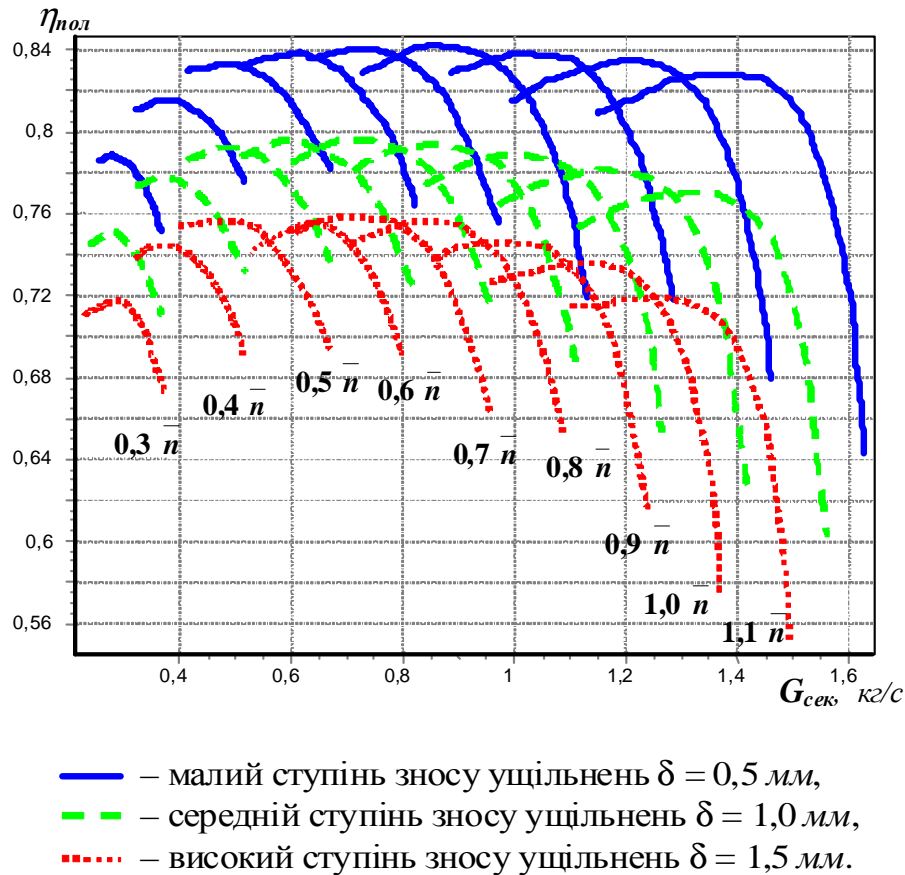


Рис.2.8 – Характеристика політропного ККД ВЦН ТКР-11 для трьох ступенів зносу ущільнень

Аналіз положення витратно-напірної характеристики при зміні величини зазорів в ущільненні покривного диска показує, що збільшення зазорів приводить до зсуву характеристики в область менших витрат. Величина зсуву залежить від частоти обертання ротора. Зсув характеристик відображується у збільшенні крутості в області великих витрат.

Проведена кількісна оцінка зміни секундної витрати компримованого газу при фіксованій мірі стискання показала, що зі збільшенням зазору в ущільненні покривного диска в 3 рази, з 0,5 мм до 1,5 мм, секундна витрата зменшується до 10 % залежно від режиму.

Друга частина даних досліджень полягала в аналізі впливу збільшення зазору в ущільненні покривного диска на характеристики одноступінчастих і багатоступінчастих ВЦН, які експлуатують на компресорних станціях ГТС України.

При цьому були проведені наступні види досліджень:

- за вірогідністю результатів оцінки впливу величини зазору в ущільненні покривного диска на фактичні характеристики ВЦН шляхом порівняння результатів з експериментальними даними [56];
- за оцінкою впливу величини зазору і зведеної об'ємної продуктивності одноступінчастих ВЦН типу 520-12-1 і триступінчастих ВЦН ГПА Ц-6,3С/41-1,7 на зміну положення їхніх фактичних характеристик;
- за оцінкою впливу величини зазору і зведеної об'ємної продуктивності багатоступінчастих ВЦН типу Demag 655 P2, Н-650-21-2, НЦ1-16С/76-1,44 і Ц 6,3С/41-1,7 на зміну положення їхніх фактичних характеристик.

На рис.2.9 ÷ 2.12 наведені результати чисельного дослідження характеристик ВЦН типу 520-12-1. Досліджувався вплив збільшення радіального зазору  $\Delta_n = (\delta - \delta_{ном}) / \delta_{ном}$  в ущільненнях робочого колеса і об'ємної зведеної продуктивності на міру стискання (рис. 2.9 ÷ 2.10) і політропний ККД ВЦН (рис. 2.11 ÷ 2.12). Результати порівнювались з характеристиками, що наведені в [56] (рис. 2.10 и 2.12, лінія 1).

На рис.2.9 і 2.11 використані наступні позначення характеристик:

- — номінального значення, зазору в ущільненні покривного диска,
- - - малого ступеня зносу ущільнень  $\Delta_n = 1,5$ ,
- ..... високого ступеня зносу ущільнень  $\Delta_n = 3,5$ .

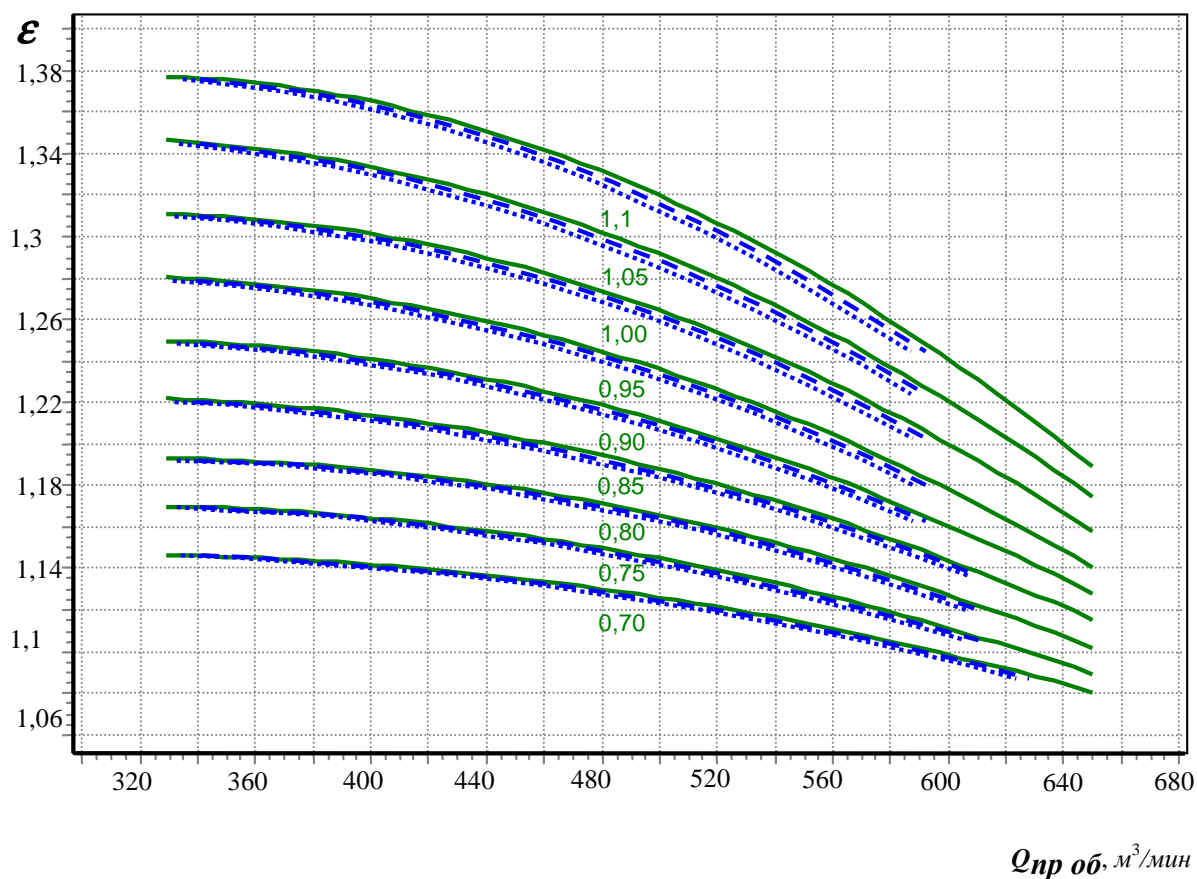
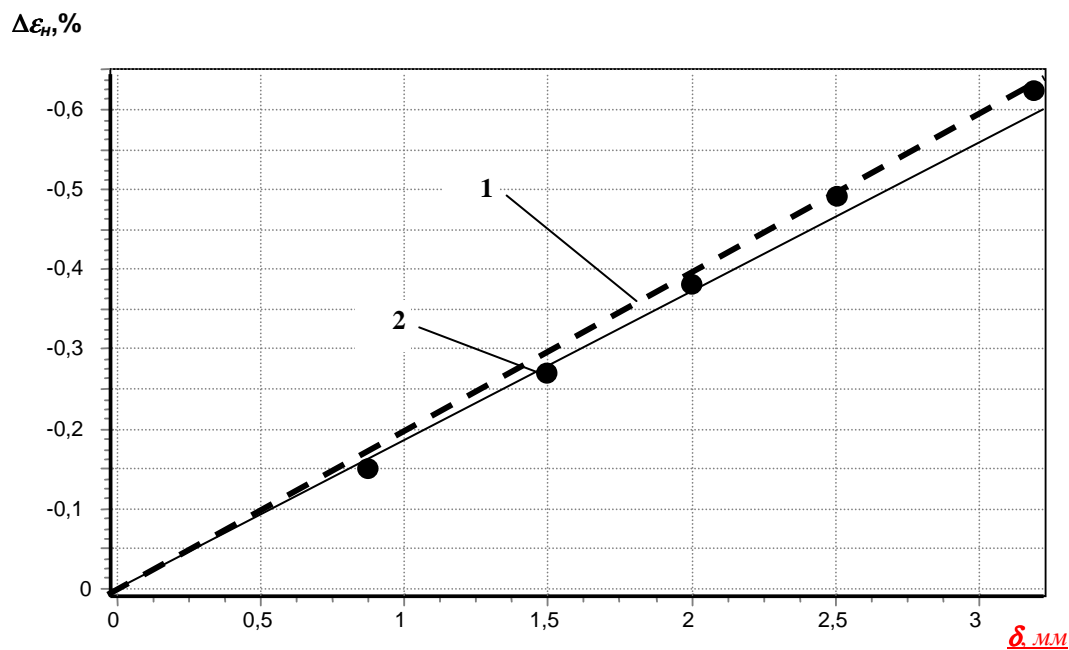


Рис.2.9 – Витратно-напірна характеристика ВЦН 520-12-1 для трьох ступенів зносу ущільнення покривного диска



- 1 – експериментальні дані з [56],
- 2 – розрахункові дані для номінальної об'ємної продуктивності ВЦН.

Рис.2.10 – Вплив зазору в ущільненні покривного диска на міру стиснення ВЦН 520-12-1



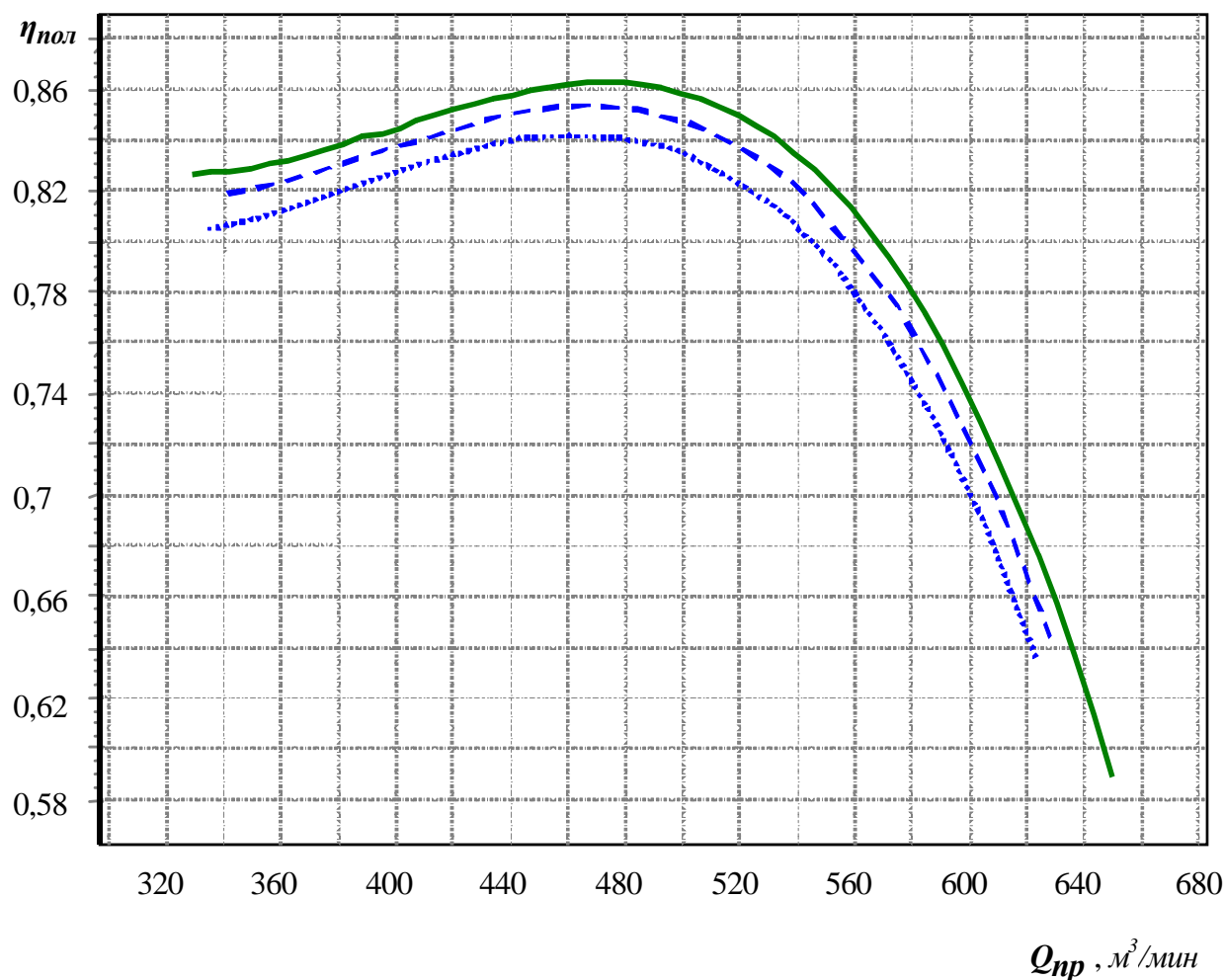
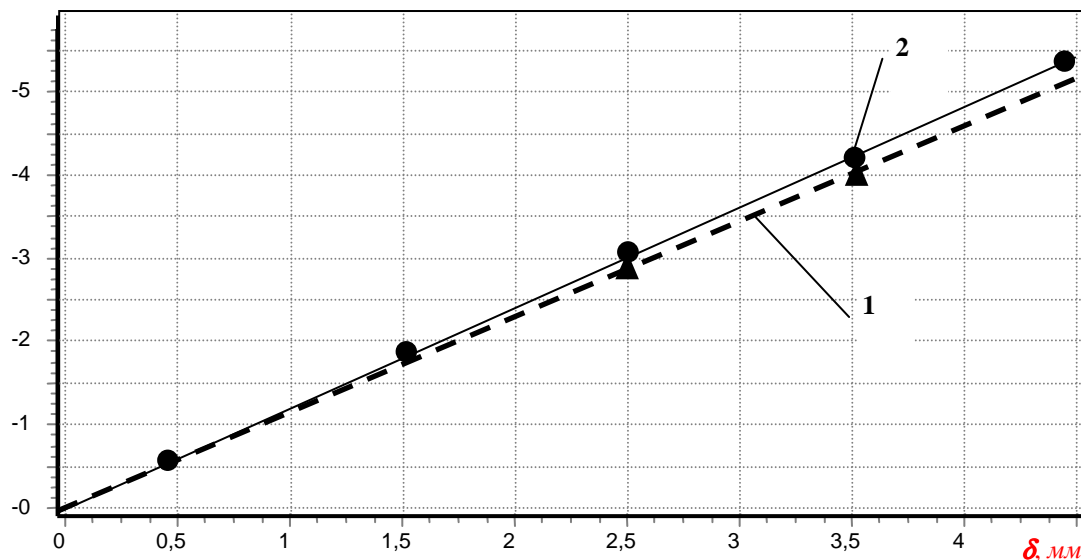


Рис.2.11 – Вплив зносу ущільнення покривного диска на політропний ККД ВЦН 520-12-1

З наведених на рис.2.9 – 2.11 графічних залежностей видно, що розраховані залежності міри стискання, отримані при  $Q_{пр} = Q_{пр\text{ ном}}$  незначно відрізняються від відповідних експериментальних залежностей [56] (максимальне відхилення не перевищило 0,5 %). Подібні результати отримані і для інших типів ВЦН. Виявлена розбіжність пояснюється тим, що характеристики, що наводять в різних інструкціях з оцінки фактичного технічного стану, спираються на результати експериментів, що проводилися при режимах близьких до номінального. Отримані результати дослідження з оцінки вірогідності свідчать про можливість використання розробленого методу для оцінки впливу зазору покривного диска на фактичні характеристики ВЦН.

$\Delta\eta, \%$



1 – експериментальні дані з [56],

2 – розрахункові дані для номінальної об'ємної продуктивності ВЦН.

Рис.2.12 -- Вплив зазору в ущільненні покривного диска на зміну політропного ККД ВЦН 520-12-1

На рис.2.13 ÷ 2.18 наведені результати розрахунку величини

$$\text{зменшення міри стискання: } \Delta\varepsilon(\delta, Q_{np}) = \frac{\varepsilon^P(\delta, Q_{np}) - \varepsilon^{\Pi}(Q_{np})}{\varepsilon^{\Pi}(Q_{np})},$$

$$\text{потужності: } \Delta N(\delta, Q_{np}) = \frac{N^P(\delta, Q_{np}) - N^{\Pi}(Q_{np})}{N^{\Pi}(Q_{np})}$$

$$\text{ККД: } \Delta\eta(\delta, Q_{np}) = \frac{\eta_{пол}^P(\delta, Q_{np}) - \eta_{пол}^{\Pi}(Q_{np})}{\eta_{пол}^{\Pi}(Q_{np})}$$

для ВЦН 520-12-1 і ВЦН ГПА Ц-6,3С/41-1,7 в залежності від величини зазору  $\delta$  в ущільненні покривного диска і зведеної об'ємної продуктивності. Індекс  $\Pi$  позначає параметр, розрахований за паспортними характеристиками, а  $P$  – параметр, розрахований відповідно до розробленого методу. Розрахунки проведені для номінальної частоти обертання ротора ВЦН.

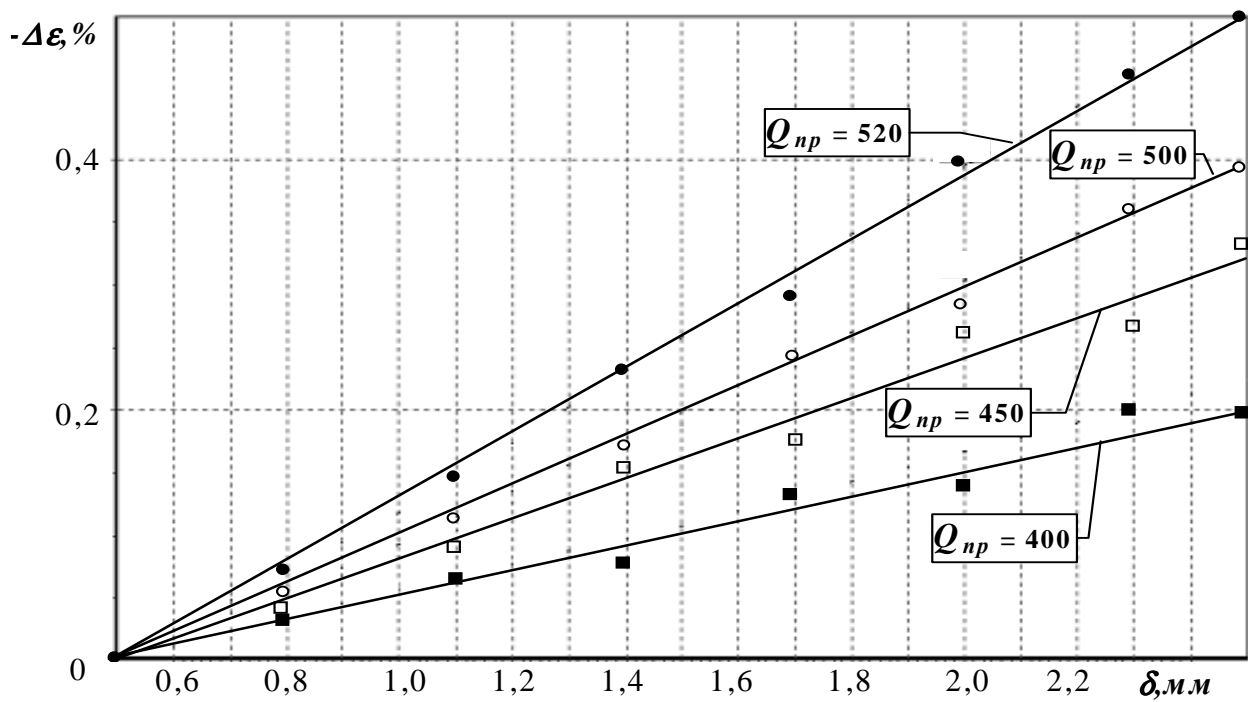


Рис.2.13 – Вплив радіального зазору ущільнення покривного диска і зведеної об'ємної продуктивності на зменшення міри стиснення ВЦН 520-12-1

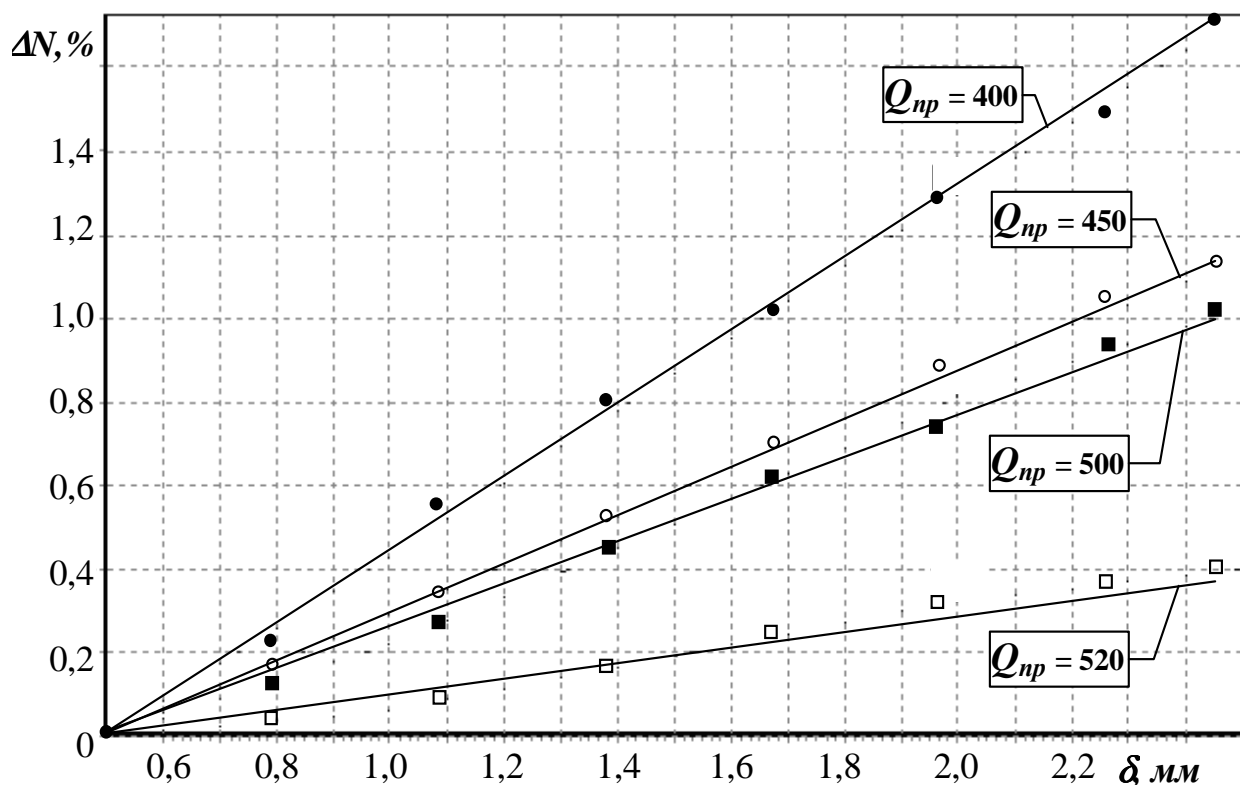


Рис.2.14 – Вплив радіального зазору ущільнення покривного диска і зведеної об'ємної продуктивності на зменшення потужності ВЦН 520-12-1

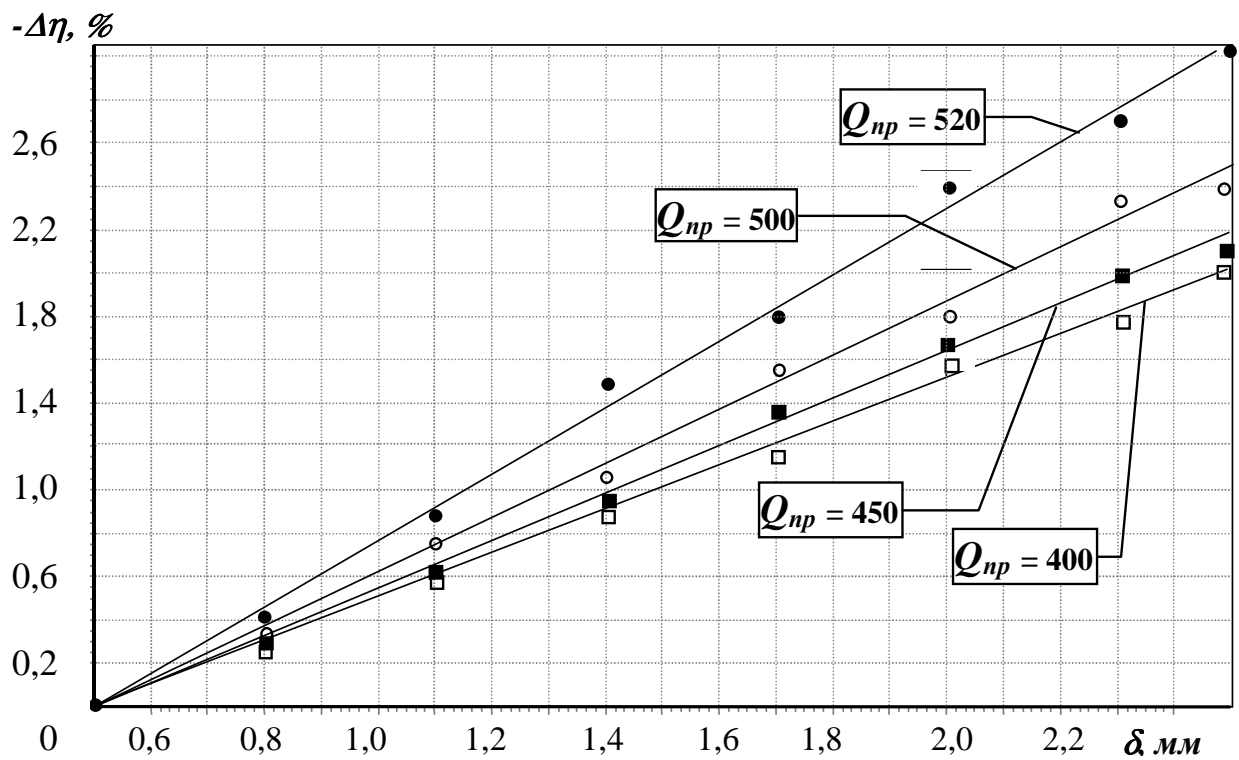


Рис.2.15 – Вплив радіального зазору ущільнення покривного диска і зведеної об'ємної продуктивності на зменшення ККД ВЦН 520-12-1

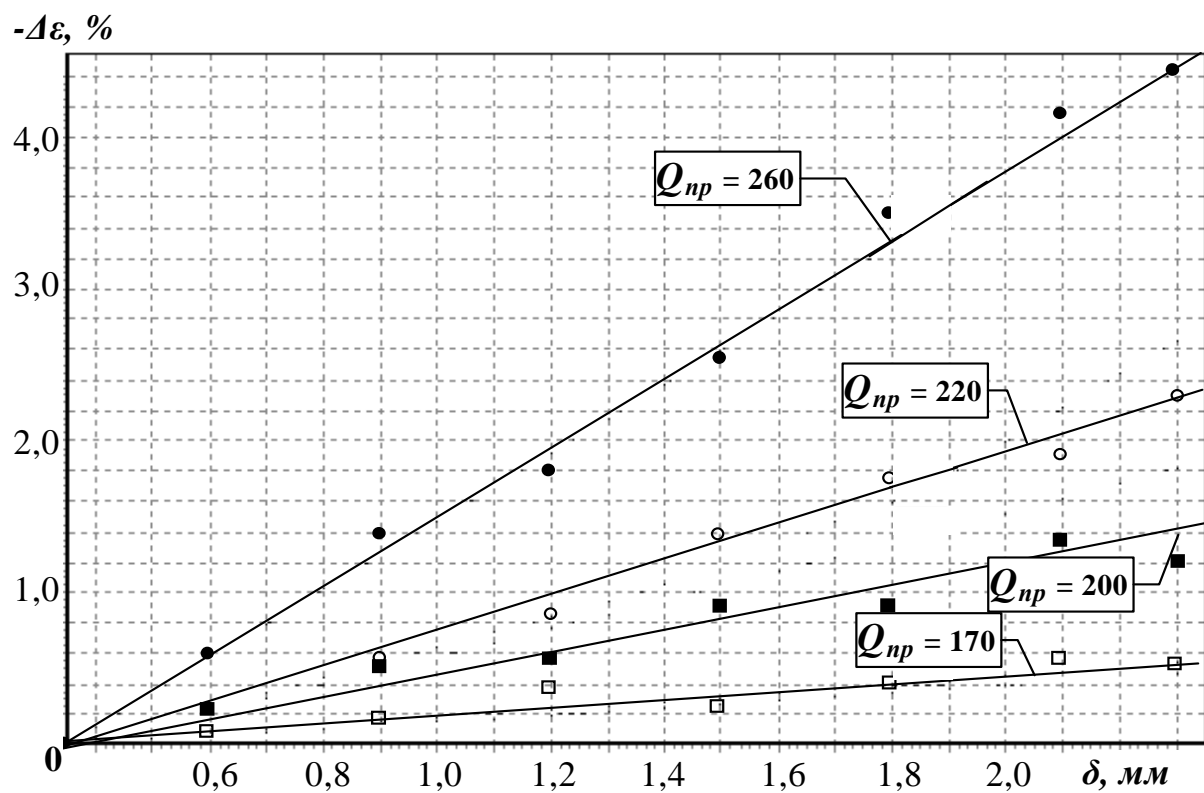


Рис.2.16 – Вплив радіального зазору ущільнення покривного диска і зведеної об'ємної продуктивності на міру стиснення ВЦН Ц-6,3С/41-1,7

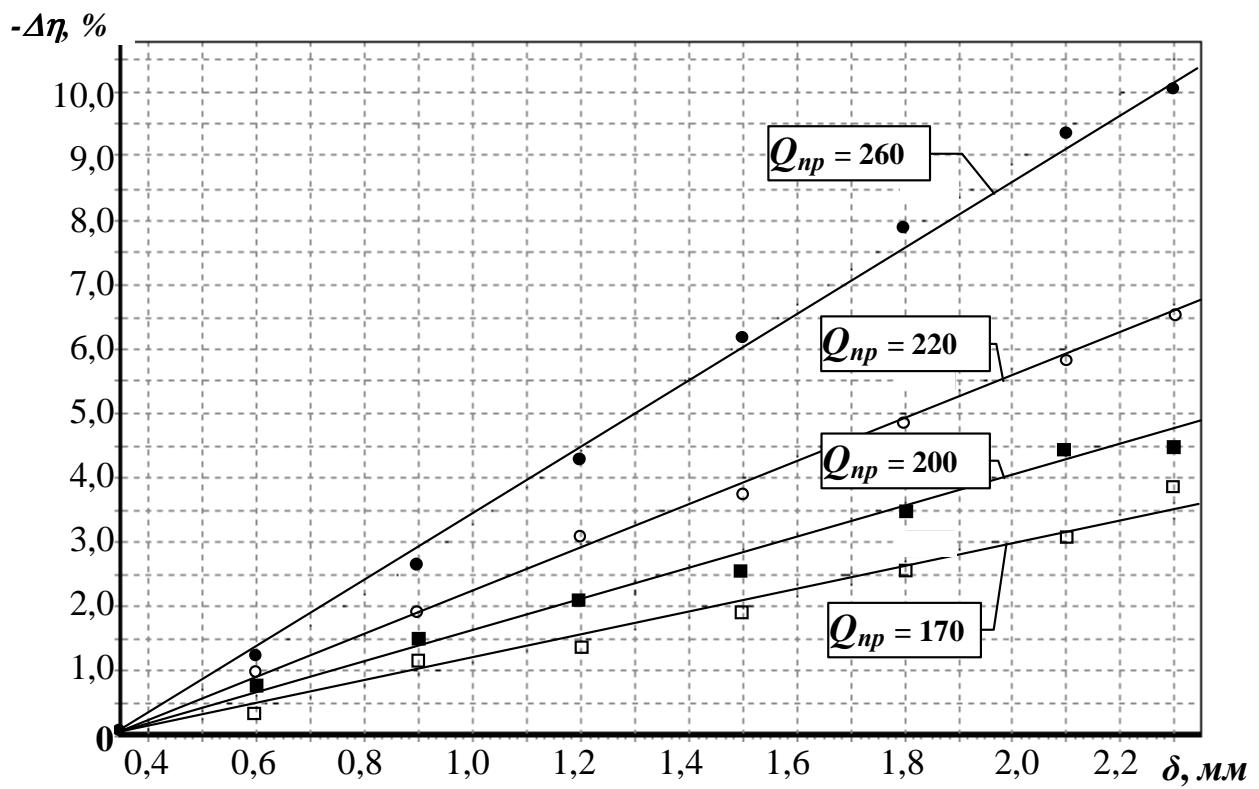


Рис.2.17 – Вплив радіального зазору ущільнення покривного диска і зведеної об'ємної продуктивності на ККД ГПА Ц-6,3С/41-1,7

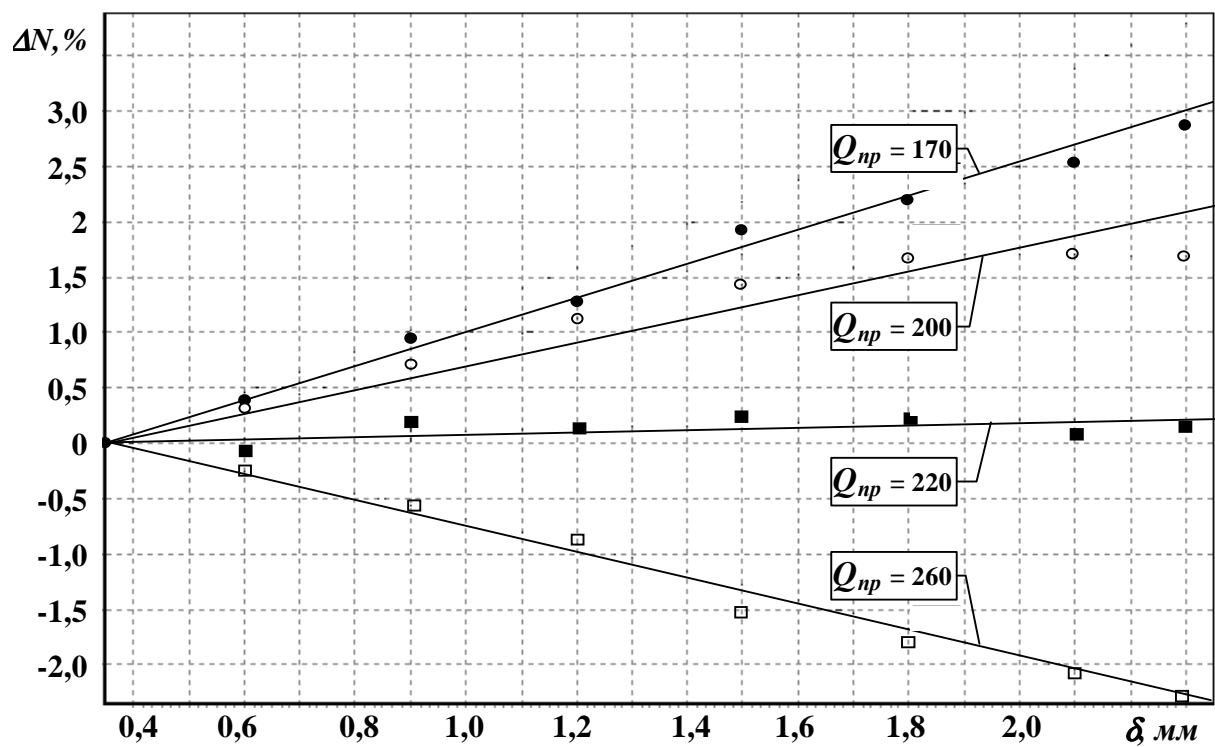


Рис.2.18 – Вплив радіального зазору ущільнення покривного диска і зведеної об'ємної продуктивності на потужність ВЦН Ц-6,3С/41-1,7

Вплив збільшення зазорів в ущільненнях покривних дисків для ВЦН, що мають два та більше ступенів стискання при  $n = n_{ном}$  и  $G_{сек} = G_{сек ном}$  наведено на рис.2.19÷ 2.21. При цьому величини зазорів покривних дисків у багатоступінчастому ВЦН приймалися рівними між собою. Як видно з рисунків, зі збільшенням ступенів ВЦН вплив зазорів в ущільненнях покривних дисків на зміну міри стиснення і політропного ККД збільшується.

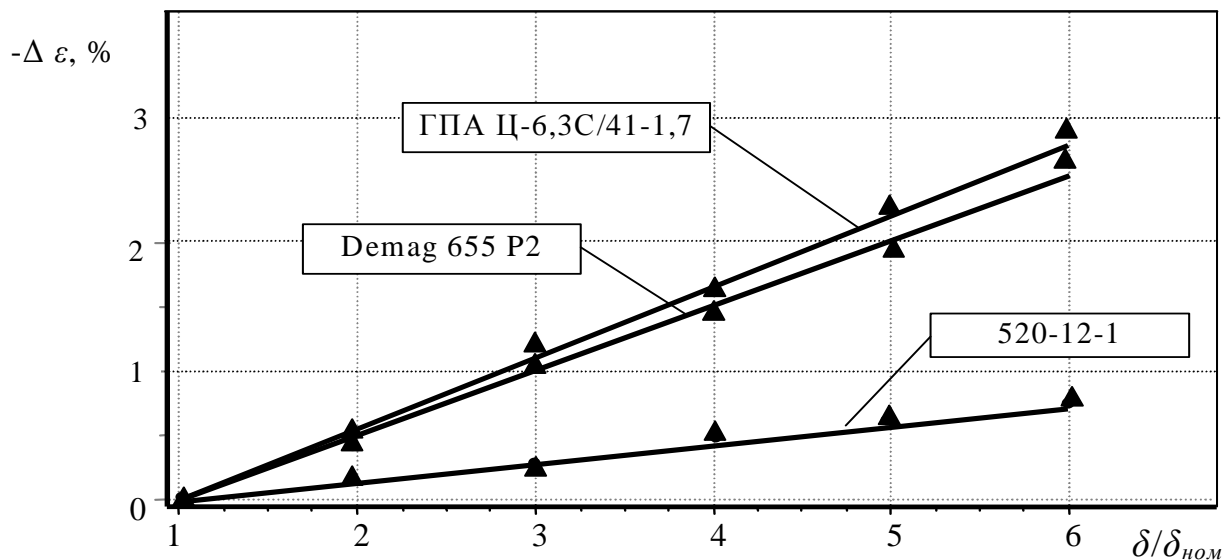


Рис.2.19 – Залежність зміни міри стиснення від збільшення зазору покривного диска для різних за кількістю ступенів ВЦН при номінальному значенні частоти обертання ротора нагнітачів і витрат компримованого газу

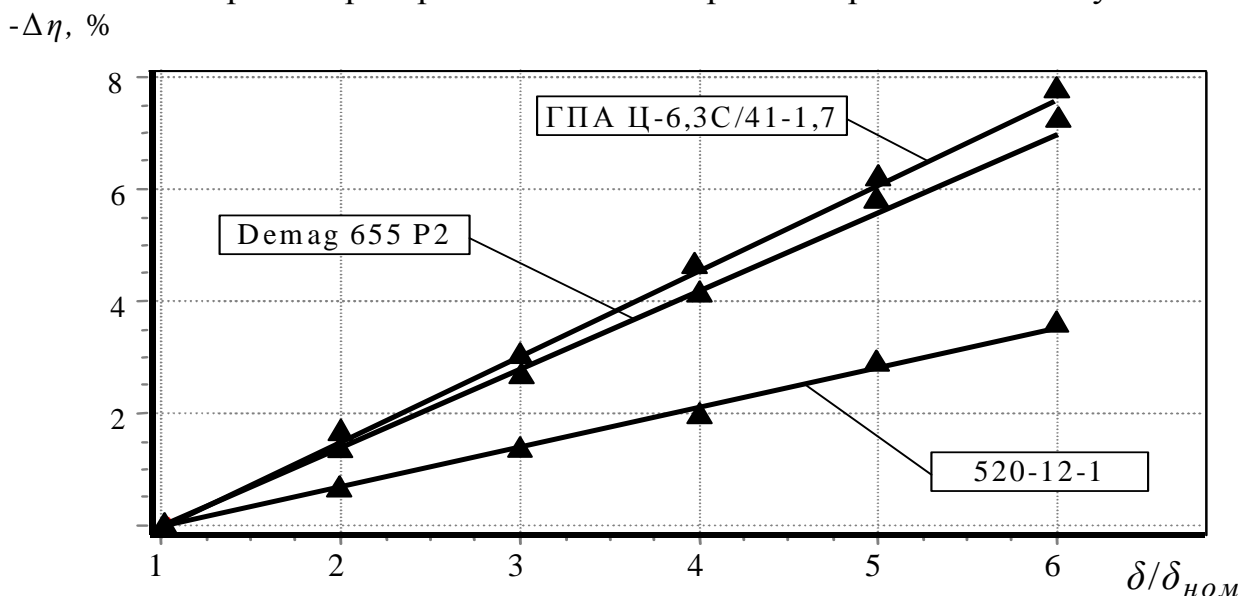


Рис.2.20 – Залежність ККД від збільшення зазору покривного диска для різних за кількістю ступенів ВЦН при номінальному режимі роботи

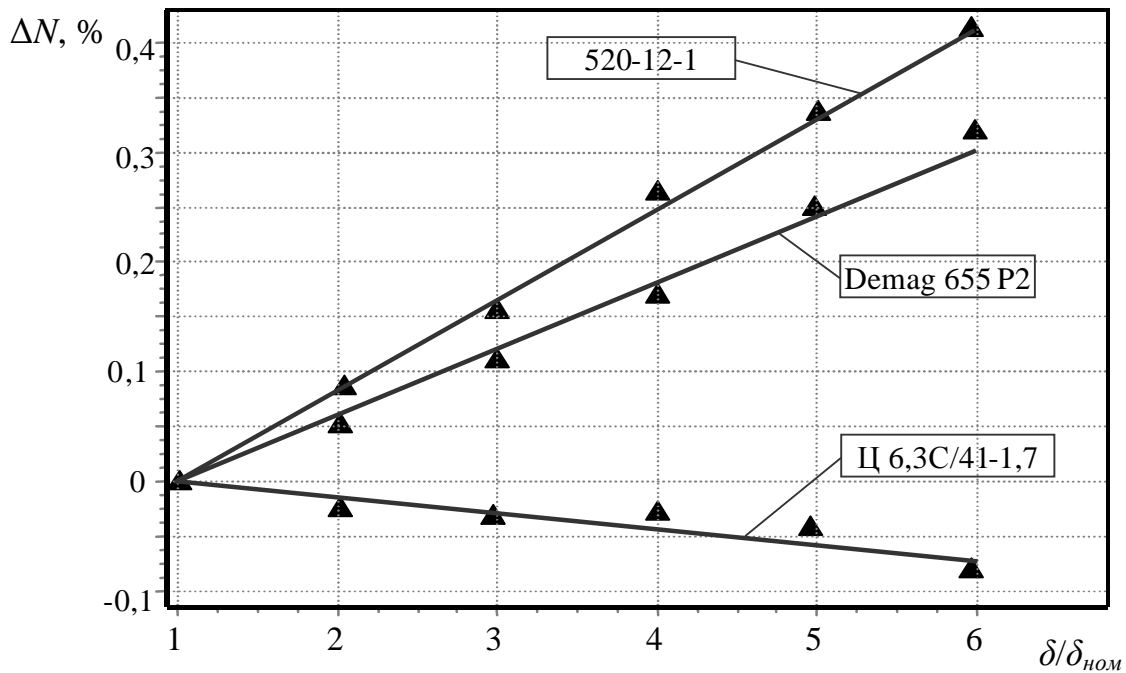


Рис. 2.21 – Залежність потужності від відносного збільшення зазору ущільнення для різних за кількістю ступенів ВЦН при номінальному режимі роботи

Зміна внутрішньої потужності ВЦН від збільшення зазору ущільнення покривного диска є неоднозначною. Так, для ВЦН типу Ц-6,3С/41-1,7 спостерігається зниження споживаної потужності (рис.3.18 і 3.21) у визначеному діапазоні зміни зведеної об'ємної продуктивності. Це пояснюється тим, що в цьому діапазоні зі зменшенням зазорів зменшення ККД відбувається швидше, ніж зменшення внутрішньої питомої роботи.

З огляду на характер зміни фактичних характеристик ВЦН у залежності від величини зазору ущільнення покривного диска і зведеної об'ємної продуктивності є можливість апроксимувати одержані результати поліномом першого ступеня виду

$$f(\delta, Q_{np}) = k(Q_{np}) \cdot \delta + b(Q_{np}), \quad (2.54)$$

$$\text{де } f(\delta, Q_{np}) = \begin{Bmatrix} \Delta \varepsilon(\delta, Q_{np}) \\ \Delta N(\delta, Q_{np}) \\ \Delta \eta(\delta, Q_{np}) \end{Bmatrix}.$$

Коефіцієнти лінійної апроксимації даних, отриманих з розрахунку залежності міри стиснення, політропного ККД і потужності від зміни величини зазору в ущільненні покривного диска наведені в табл.2.1.

Отримані у вигляді поліномів залежності зміни функціональних параметрів режиму роботи ВЦН від величини зносу ущільнень покривного диска, дозволяють робити оперативний розрахунок фактичних параметрів режиму роботи ГПА, як в умовах експлуатації (у складі САУ КЦ, САУ ГПА), так і на верхньому рівні керування ГТС при визначенні фактичних характеристик в умовах неповноти й невірогідності вхідної інформації.

Таблиця 2.1 – Коефіцієнти апроксимації зміни фактичних характеристик ВЦН у функції від величини зазору покривного диска

Зведена об'ємна продуктивність, $m^3/xв$	Зміна ступеня стиснення від зазору		Зміна ККД від зазору		Зміна потужності від зазору	
	$k(Q_{np}),$ 1/мм	$b(Q_{np})$	$k(Q_{np}),$ 1/мм	$b(Q_{np})$	$k(Q_{np}),$ 1/мм	$b(Q_{np})$
ГПА Ц-6,3С/41-1,7						
170	0,21	0,01	1,8	0,4	1	0
200	0,78	0,36	2,4	0,8	1,1	0,9
220	1,15	0,04	3,4	1,2	0,01	0
260	2,3	0,8	5,6	2,6	-1,3	-0,6
ВЦН 520-12-1						
400	0,09	0,03	1	0,4	0,18	0,06
450	0,16	0,07	1,11	0,49	0,31	0,01
500	0,19	0,07	1,2	0,45	0,1	-0,21
550	0,26	0,11	1,55	0,65	0,78	0,18

У табл.2.2 для ВЦН різних типів наведені результати розрахунків відношення зміни ККД і міри стиснення при збільшенні зазору в ущільненні покривного диска на 1,5 мм.



Таблиця 2.2 – Відношення зміни ККД і міри стиснення при збільшенні величини зазору в ущільненні покривного диска для ВЦН різних типів

Запор, мм	Діаметр ущільнення, м	Число ступенів	Номінальна витрата, м <sup>3</sup> /хв	Фактична витрата, м <sup>3</sup> /хв	Δε, %	Δη, %	Δη/Δε
520-12-1							
1,0	0,46	1	520	400	0,12	1,12	9,54
				450	0,18	1,19	6,46
				500	0,2	1,33	6,16
				550	0,28	1,65	5,97
Demag 655 P2							
1,0	0,416	2	240	180	0,32	2,2	6,87
				200	0,65	2,37	3,65
				240	1,15	2,8	2,43
				280	1,8	3,7	2,05
H-650-21-2							
1,0	0,64	2	530	460	0,08	1,13	14,06
				530	0,16	1,22	7,62
				600	0,3	1,5	5,00
				670	0,48	2	4,21
HЦ 1-16C/76-1,44							
1,0	0,525	2	400	350	0,19	0,9	4,74
				400	0,35	1,3	3,71
				450	0,62	1,9	3,06
				500	1,2	3,3	2,75
Ц 6,3C/41-1,7							
1,0	0,324	3	230	170	0,26	1,8	6,92
				200	0,6	2,5	4,7
				220	1,04	3,3	3,18
				260	2,3	5,2	2,26
ГПА-Ц-6,3/125-2.2							
1,0	0,27	6	50	38	0,73	2,78	3,82
				46	1,83	4,53	2,47
				54	3,25	6,35	1,95
				62	8,18	8,75	1,07

Аналіз результатів, наведених у табл.2.2 показує, що середнє відхилення розрахункового значення ступеня стиснення від паспортного значення при зміні величини зазору ущільнення до 1,5 мм склало 1,12 %. Середнє відхилення ККД при такому ж збільшенні зазору дорівнювало  $2 \div 3$  %. Як видно з таблиці, на величину цих відхилень визначальний вплив має число ступенів ВЦН.

Отримані результати свідчать про те, що вплив зносу елементів проточної частини на характеристики ВЦН неоднорідний у всій області припустимих режимів роботи. Тому розрахунок фактичних параметрів режиму за паспортними характеристиками із внесенням єдиних виправлень для всієї області припустимих режимів, як це прийнято в існуючих методиках, дає значні похибки. Розрахунок фактичних характеристик ВЦН запропонованим методом дозволяє з великим ступенем точності врахувати вплив зносу на фактичні параметри режиму для всього діапазону робочих навантажень. Розроблений метод також дозволяє визначати ФТС тих типів ВЦН, для яких експериментальні дослідження з впливу зазору ущільнення покривного диска на характеристики не проводилися.

#### ***Аналіз вірогідності результатів діагностування в умовах КС за інформацією від штатних засобів виміру***

Оцінка вірогідності визначення ФТС ВЦН на основі розробленого методу проводилася:

- в умовах КС, за інформацією від штатних засобів виміру, шляхом порівняння розрахованих обсягів комерційної продуктивності ВЦН з обмірюваними значеннями;
- при проведенні ряду теплотехнічних випробувань, шляхом порівняння розрахованої величини зазору в ущільненні покривного диска за параметрами, обмірюваними перед розкриттям нагнітача, з обмірюваними значеннями величини зазору на розкритому ВЦН.

Вірогідність результатів діагностування в умовах експлуатування оцінювали за інформацією АСКТП КЦ КС з ГПА Ц-16С, а також на КС з ВЦН НЦ 6,3/41-1.45 першої ступені компримування і ВЦН НЦ 6,3/56-1.45 другої ступені компримування.

Аналіз вірогідності полягав у виконанні розрахунку величини зазору покривного диска і фактичних характеристик ВЦН за інформацією від штатних засобів виміру і порівнянні значень комерційної продуктивності ВЦН, розрахованих за фактичними характеристиками з відповідними обмірюваними значеннями. Для ГПА, що вводяться в експлуатацію, крім порівняння значень комерційної продуктивності, аналіз вірогідності містив у собі також порівняння значень розрахункової потужності ВЦН зі значеннями потужності, обчисленими за характеристиками ГТУ, що були отримані під час приймальних випробувань.

Так, при введенні в експлуатацію КЦ ГПА Ц-16С із приводом ДГ-90Л2 і ВЦН Ц16С/76 1,44 оцінка вірогідності проводили за аналізуванням відхилення розрахункових значень комерційної продуктивності і потужності агрегату від відповідних обмірюваних або розрахованих за даними штатних засобів виміру. З одного боку, потужність ВЦН розраховували програмним комплексом визначення ФТС ГПА у складі АСК ТП КЦ, створеним на основі розробленого методу. З іншого, визначали потужність приводу на основі фактичної універсальної характеристики ГТУ, що була отримана в результаті приймальних випробувань. Розбіжність між значеннями потужності, розрахованими за параметрами ВЦН і значеннями потужності, розрахованими за параметрами ГТУ, з урахуванням механічних втрат на муфті ВЦН, склало  $150 \div 200 \text{ кВт}$  або у відносних величинах  $1,2 \div 1,6 \%$ .

Розраховану комерційну продуктивність ВЦН Ц16С/76-1,44 порівнювали з обмірюваною величиною, отриманою від системи комерційного обліку газу на основі датчика "Аннубар". Відносна величина розбіжності за результатами випробувань на даній КС не перевищила 2 %.

Аналіз вірогідності визначення фактичних характеристик ВЦН із двома ступенями компримування КЦ виконувався тільки за значеннями розрахованої комерційної продуктивності КЦ і обмірюваної. У табл.2.3 наведені обмірювані значення і результати розрахунку комерційної продуктивності ГПА № 2 і № 3 із ВЦН НЦ-6,3/41-1.45 1-го ступеня. У таблиці 2.4 приведені аналогічні параметри ГПА № 5 і ГПА № 6 із ВЦН НЦ-6,3/56-1.45 2-го ступеня цього КЦ. Також у таблицях наведено відхилення розрахункової комерційної продуктивності КЦ від обмірюваної.

Таблиця 2.3 – Порівняння розрахункової комерційної продуктивності ВЦН НЦ-6,3/41-1.45 першого ступеня компримування з виміряною комерційною продуктивністю КЦ

Дата і час надходження оперативних даних	Виміряна комерційна продуктивність КЦ	Розрахункова комерційна продуктивність по ГПА № 2	Розрахункова комерційна продуктивність по ГПА № 3	Розрахункова комерційна продуктивність 1-ї ступені (ГПА № 2 и ГПА № 3)	Відхилення розрахункової комерційної продуктивності від виміряної
	<i>млн.м<sup>3</sup>/доб</i>	<i>млн.м<sup>3</sup>/доб</i>	<i>млн.м<sup>3</sup>/доб</i>	<i>млн.м<sup>3</sup>/доб</i>	%
07.02.2003 12:00	15,38	7,67	7,36	15,03	-2,31
08.02.2003 12:00	15,19	7,09	7,30	14,39	-5,27
09.02.2003 12:00	14,81	6,89	7,13	14,02	-5,33
10.02.2003 12:00	14,69	7,03	7,56	14,59	-0,70
11.02.2003 12:00	14,64	7,31	7,49	14,79	1,05
12.02.2003 12:00	14,83	7,15	7,14	14,29	-3,67
13.02.2003 12:00	14,59	7,01	6,97	13,97	-4,24
14.02.2003 12:00	14,57	6,89	7,02	13,91	-4,50
15.02.2003 12:00	14,14	6,61	6,76	13,37	-5,40
16.02.2003 12:00	13,85	6,31	6,87	13,18	-4,85

Таблиця 2.4 – Оцінка відхилення розрахункової комерційної продуктивності ВЦН НЦ-6,3/56-1.45 другого ступеня компримування (ГПА № 5 і ГПА № 6) від виміряної комерційної продуктивності КЦ

Дата і час надходження оперативних даних	Виміряна комерційна продуктивність КЦ	Розрахункова комерційна продуктивність по ГПА № 5	Розрахункова комерційна продуктивність по ГПА № 6	Розрахункова комерційна продуктивність 2-ї ступені (ГПА № 5 и ГПА № 6)	Відхилення розрахункової комерційної продуктивності від виміряної
	<i>млн.м<sup>3</sup>/доб</i>	<i>млн.м<sup>3</sup>/доб</i>	<i>млн.м<sup>3</sup>/доб</i>	<i>млн.м<sup>3</sup>/доб</i>	%
07.02.2003 12:00	15,24	7,60	7,25	14,85	-2,59
08.02.2003 12:00	15,19	7,51	7,08	14,59	-3,95
09.02.2003 12:00	14,81	7,45	6,95	14,40	-2,77
10.02.2003 12:00	14,69	7,26	6,81	14,07	-4,21
11.02.2003 12:00	14,64	7,48	6,82	14,30	-2,29
12.02.2003 12:00	14,83	7,24	7,01	14,25	-3,92
13.02.2003 12:00	14,59	7,29	6,94	14,23	-2,50
14.02.2003 12:00	14,57	7,11	6,97	14,09	-3,31
15.02.2003 12:00	14,16	7,16	6,25	13,41	-5,28
16.02.2003 12:00	13,90	6,97	6,41	13,38	-3,71

- для ГПА № 2 і № 3 - 3,52 %;
- для ГПА № 5 і № 6 - 3,45 %.

Аналіз вірогідності результатів діагностики ВЦН за даними теплотехнічних випробовувань був проведений для ВЦН Demag 655 P2. Під час проведення теплотехнічних випробовувань порівнювалися розраховані величини зазору в ущільненні покривного диска з обміряними значеннями величини зазору на розкритих ВЦН ГПА № 2 і № 3.

The diagram illustrates a gas turbine engine with a preheated air system. The main components and sensors are as follows:

- Intake and Preheating:** Air enters from the left, passing through a temperature sensor  $T_a$  and a pressure sensor  $P_a$ . It then flows through a preheater  $B3V$ , which is monitored by a pressure difference sensor  $\Delta P_1$ .
- Compression:** The air then enters the compressor  $OK$ , which is monitored by a pressure sensor  $P_2$  and a temperature sensor  $T_2$ .
- Combustion:** The compressed air enters the combustor  $KC$ , which is monitored by a temperature sensor  $T_3$  and a pressure sensor  $P_3$ .
- Turbine and Exhaust:** The combustion products expand through the turbine  $TGT$  (monitored by  $T_4$  and  $P_4$ ) and then through the exhaust  $ЦБН$  (monitored by  $T_5$  and  $P_5$ ).
- Preheated Air System:** A separate loop of preheated air is shown, passing through a combustor  $BY$  (monitored by  $\Delta P_2$ ) and then through a turbine  $TGT$  (monitored by  $T_6$  and  $P_6$ ).
- Exhaust and Sensors:** The exhaust system includes a temperature sensor  $T_7$ , a pressure sensor  $P_7$ , and a pressure difference sensor  $\Delta P_3$ .

86

Одним з вимірюваних параметрів, що істотно впливає на значення ККД ВЦН, є температура газу на виході з ВЦН  $T_{\text{вих}}$ . Температура  $T_{\text{вих}}$  повинна при всіх інших незмінних умовах (частоті обертання ротора ВЦН, параметрах на вході ВЦН і т.п.) знаходитися в діапазоні температур:  $T_{\text{вих}}^{\text{эм}} < T_{\text{вих}} < T_{\text{вих}}^{\text{max}}$ . Де  $T_{\text{вих}}^{\text{эм}}$  – температура, що відповідає паспортному ККД для даного режиму, а  $T_{\text{вих}}^{\text{max}}$  – максимально можлива температура на даному режимі, що відповідає зниженню ККД на гранично можливу величину. Тому, при аналізі вихідних даних на вірогідність перевіряють відповідність фактичної температури  $T_{\text{вих}}$  наведеному діапазону. Для ВЦН ГПА № 2 і № 3 значення температури газу на виході ВЦН задовольняло наведеній вище умові.

Клас точності виміру приладів при проведенні теплотехнічних випробувань склав: за датчиком тиску - 0,2 % від шкали виміру, за датчиками температури - 0,25 %, за датчиком частоти обертання ротора ВЦН - < 0,1 %.

Склад компримованого газу, що використовувався в газодинамічному розрахунку (за даними лабораторного аналізу) склав:  $\text{CH}_4$  – 98,515 %,  $\text{C}_2\text{H}_6$  – 0,43 %,  $\text{N}_2$  – 0,79 %,  $\text{CO}_2$  – 0,03 %.

У табл.2.5 наведені обмірювані параметри і результати розрахунків для ВЦН Demag 655 P2.

Обмірювана середня величина радіального зазору в ущільненні покривного диска обчислювалася в умовах експлуатації.

Результати аналізу вірогідності розрахунку радіального зазору в ущільненні покривного диска ВЦН Demag 655 P2 ГПА № 2 і № 3 наведені в табл.2.6.

Аналіз результатів розрахунків, наведених у табл.2.4 показує, що максимальне відхилення між розрахованими значеннями радіального зазору і обмірюваними середніми значеннями складає 0,15 мм, що є припустимим для зазначеного вище класу точності вимірів.

Таблиця 2.5 - Обмірювані параметри і результати розрахунків ФТС ВЦН  
Demag 655 P2

Параметр	Позначення	Параметр	Позначення	Параметр	Позначення	Параметр	Позначення
1	2	3	4	5	6	7	8
Тиск на вході у ВЦН	$P_{вх}$	$кгс/см^2$	54,9	54,9	54,8	54,8	54,8
Тиск на виході ВЦН	$P_{вих}$	$кгс/см^2$	70,5	70,4	70,3	70,3	70,3
Температура на вході у ВЦН	$T_{вх}$	$К$	300,9	300,9	300,8	300,9	300,9
Температура на виході ВЦН	$T_{вих}$	$К$	324,1	324,2	324,3	324,3	324,2
Частота обертання ротора ВЦН	$n$	$об/хв$	5661	5663	5660	5653	5659
Коефіцієнт стиснення за параметрами на вході	$Z_1$	–	0,9091	0,9090	0,9092	0,9092	0,9091
Відносна частота обертання ротора ВЦН	$\frac{n}{n_{ном}}$	–	0,8709	0,8712	0,8708	0,8697	0,8707
Зведена відносна частота обертання ротора ВЦН	$\left[ \frac{n}{n_{ном}} \right]_{пр}$	–	0,8339	0,8343	0,8338	0,8328	0,8337
Внутрішня робота	$H_u$	$Дж/кг$	46926,6	47456,5	47494,6	47468,7	47336,5
Політропний ККД	$\eta_{пол}$	–	0,805	0,791	0,791	0,792	0,795
Потужність ВЦН паспортна	$N_u^П$	$кВт$	6625,87	6626,4	6602,9	6580,9	6609,6
Внутрішня потужність ВЦН	$N_u^f$	$кВт$	6554,22	6659,5	6637,6	6615,7	6616,8
Зведена об'ємна продуктивність	$Q_{пр}$	$м^3/хв$	220,87	221,84	221,4	220,8	221,20
Секундна витрата газу	$G_{сек}$	$кг/сек$	139,67	140,33	139,76	139,37	139,78
Комерційна продуктивність ВЦН	$Q_{ком}$	$млн. м^3/доб$	17,82	17,90	17,83	17,78	17,83

Таблиця 2.6 – Результати аналізу вірогідності розрахунку радіального зазору покривного диска ВЦН Demag 655 P2 ГПА № 2 і № 3

№ ГП А	Розрахована величина зазору, мм	Обмірювана середня величина зазору, мм	Абсолютне відхилення, мм	Відносна зміна,
2	0,95	0,8	+ 0,15	18,7
3	1,56	1,5	+ 0,06	4,0



### **3. ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ ЗА ДАНИМИ ШТАТНИХ ВИМІРЮВАНЬ**

Завдання вибору оцінок ФТС ГТУ і ВЦН розглядається в наступній постановці: необхідно визначити за даними штатних приладів агрегатної і цехової автоматики, даним теплотехнічних іспитів одну або кілька сукупностей параметрів і характеристик, що незалежно від типу агрегату, однозначно і з максимальною вірогідністю характеризують фактичне ФТС ВЦН і ГТУ. При цьому оцінки ФТС ВЦН і ГТУ повинні задовольняти наступним умовам:

- оцінки повинні містити достатню по складу і точності інформацію для рішення всіх технологічних завдань керування експлуатацією (керування ГПА, КС, газопроводом і в цілому ГТС, технічне обслуговування ГПА і т.д.);
- оцінки ФТС не повинні викликати утруднень для їхнього використання. Виходячи з аналізу найбільш відомих методів діагностики ГПА впливає, що результатами діагностики є:
- різні КТС ВЦН, ГТУ і ГПА в цілому [19, 42];
- фактичні приведені характеристики ВЦН і ГТУ [42];
- величини конкретних дефектів проточних частин ВЦН і ГТУ [47].

КТС, що представляють у вигляді скалярних величин, зручні для використання і дозволяють вирішувати всі технологічні задачі керування експлуатацією. У той же час, вірогідність цих коефіцієнтів низька. В основному, КТС визначаються при проведенні теплотехнічних випробувань ГПА і ВЦН на КС.

Як правило, ці випробування проводять з використанням штатних приладів агрегатної автоматики. Кількість вимірів параметрів ГПА не перевищує трьох. Зведена об'ємна продуктивність ВЦН від виміру до виміру змінюється в межах  $2 \div 3 \%$ , а частота обертання турбін - на 100 об./хв.

КТС, що розраховують, постійні для всього діапазону зведеної продуктивності ВЦН і, по суті, виступають як усереднені показники зсуву (прямого зміщення) фактичних характеристик щодо паспортних.

Інформації, що є у фактичних зведених характеристиках ВЦН і ГТУ, достатньо для вирішення технологічних задач керування транспортом газу. Вважаючи на те, що ці характеристики є функціями від одного і більш зведених параметрів, їхнє використання в ряді випадків викликає деякі затруднення. Вірогідність зведених характеристик багато в чому визначається точністю обчислення об'ємної продуктивності ВЦН. Результат розрахунку об'ємної продуктивності ВЦН за інформацією датчика перепаду тиску газу на звужуючому пристрої нагнітача дає погрішністю в десятки відсотків.

Вірогідність конкретних дефектів проточних частин ВЦН і ГТУ, що розраховуються, визначається, в основному, методичними погрішностями використовуваних математичних моделей ГТУ і ВЦН та інструментальними погрішностями виміру параметрів ГПА. При визначенні ФТС ГПА в умовах КС і вимірі параметрів штатними приладами, інструментальні погрішності настільки великі, що методи параметричної діагностики не забезпечують поділ дефектів. До того ж багато методів параметричної діагностики не пристосовані до умов, коли число "підозрюваних" у наявності дефектів проточних частин ГТУ і ВЦН більше числа вимірюваних параметрів, а ті методи, що враховують ці умови, не забезпечують обґрунтування одиничності одержуваних рішень і оцінок вірогідності результатів. У тих випадках, коли конкретні дефекти проточних частин ВЦН і ГТУ можна визначити з необхідною вірогідністю, інформація, що утримується в них, достатня для вирішення технологічних завдань керування експлуатацією. При цьому необхідно вирішити задачу визначення фактичних зведених характеристик ВЦН і ГТУ за обчисленим конкретним дефектом.

Підводячи підсумок аналізу можливого вибору в якості оцінки ФТС відомих діагностичних параметрів, слід зазначити:

- взаємозалежне завдання вибору діагностованих параметрів і характеристик ГПА в умовах КС, їхнього визначення з точністю в кілька відсотків щодо паспортних значень не вирішена;
- фактичні зведені характеристики ВЦН і ГТУ стосовно КТС мають більшу вірогідність і не ставлять таких твердих вимог до точності виміру параметрів ГПА, що необхідні для визначення конкретних значень дефектів.

Пропонується ввести поняття сукупності узагальнених дефектів проточної частини ВЦН і ГТУ, встановити однозначну відповідність між значенням кожного виду узагальненого дефекту з цієї сукупності й положенням розрахункових зведених характеристик ВЦН і ГТУ щодо паспортних.

### **3.1. УЗАГАЛЬНЕНИЙ НОРМОВАНИЙ ДЕФЕКТ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ВІДЦЕНТРОВОГО НАГНІТАЧА**

Під узагальненим нормованим дефектом проточної частини розуміють вид і значення функції зсувів фактичних зведених характеристик щодо паспортних, які відображують сукупний вплив на цей зсув різних видів конкретних дефектів проточних частин або їхніх комбінацій (зазор в ущільненні покривного диску, підріз лопаток робочого колеса і лопаткового дифузора і т.п.).

Безпосередньо види узагальнених дефектів і параметри зсуву розрахункових характеристик визначаються на основі експериментальних і теоретичних досліджень впливу найбільш ймовірних (основних) дефектів проточної частини ВЦН і їхніх комбінацій на характеристики кожного конкретного ВЦН [6, 12].

Як оцінку функціонально-технічного стану ВЦН обирають:

- величину і вид узагальненого дефекту ВЦН,  $D_c \in \{D_j\} \quad j = \overline{1, ND}$ , де  $ND$  – число введених узагальнених дефектів проточної частини ВЦН;
- фактичні зведені характеристики ВЦН, положення яких щодо паспортних однозначно визначається  $D_c$ ;
- коефіцієнт технічного стану (КТС) ВЦН.

За цими даними для цілого ряду ВЦН збільшення таких дефектів, як зазор в ущільненні покривного диска, підріз лопаток робочого колеса і лопаткового дифузора нагнітача викликає пропорційне зменшення політропного КПД і міри стиснення. Характерно, що для цих видів дефектів відношення величини зменшення міри стиснення до зменшення величини політропного КПД для різних типів ВЦН складають відношення порядку 1:5- 1:7. Конкретизувати вид дефекту проточної частини і його величину за оцінкою зсуву розрахункових або фактичних значень політропного КПД і міри стиснення щодо паспортних у цьому випадку не представляється можливим. Для ВЦН з такими дефектами в якості узагальненого дефекту доцільно вибрати просту суму дефектів.

Узагальнений нормований дефект проточної частини ВЦН визначається наступними умовами (рис.3.1):

- відповідності;
- достатності;
- ранжирування;
- нормування;
- однозначності вирішення прямої і зворотної задач.

**Умова відповідності.** Кожному виду дефекту  $D_j$  повинні відповідати фіксовані значення розрахункових характеристик зведеної міри стиснення  $\varepsilon_{np\ j}^p(Q_{np}, D_j)$  і політропного ККД  $\eta_{пол\ j}^p(Q_{np}, D_j)$  щодо паспортних при  $D_j = 1$  і визначенні функції зміни зсуву в залежності від величини дефекту  $D_j$ .

При  $D_j = 0$  розрахункові характеристики ВЦН збігаються з відповідними паспортними.

Розрахункові характеристики ВЦН являють собою залежності зведеної міри стиснення і політропного ККД у функції від зведеної об'ємної продуктивності для різних дефектів і їхніх комбінацій. З метою зменшення обсягу обчислень розрахункові характеристики ранжируються за видом узагальненого нормованого дефекту [24].

Проведені дослідження показали, що зсув розрахункових характеристик  $\varepsilon_{np\ j}^p$ ,  $\eta_{пол\ j}^p$  щодо паспортних  $\varepsilon_{np}^p$ ,  $\eta_{пол}^p$  визначається двома параметрами  $\delta\varepsilon_{min\ j}$  и  $\delta\eta_{min\ j}$  на лівому кінці характеристик при  $Q_{np} = Q_{min}$  і відповідно двома

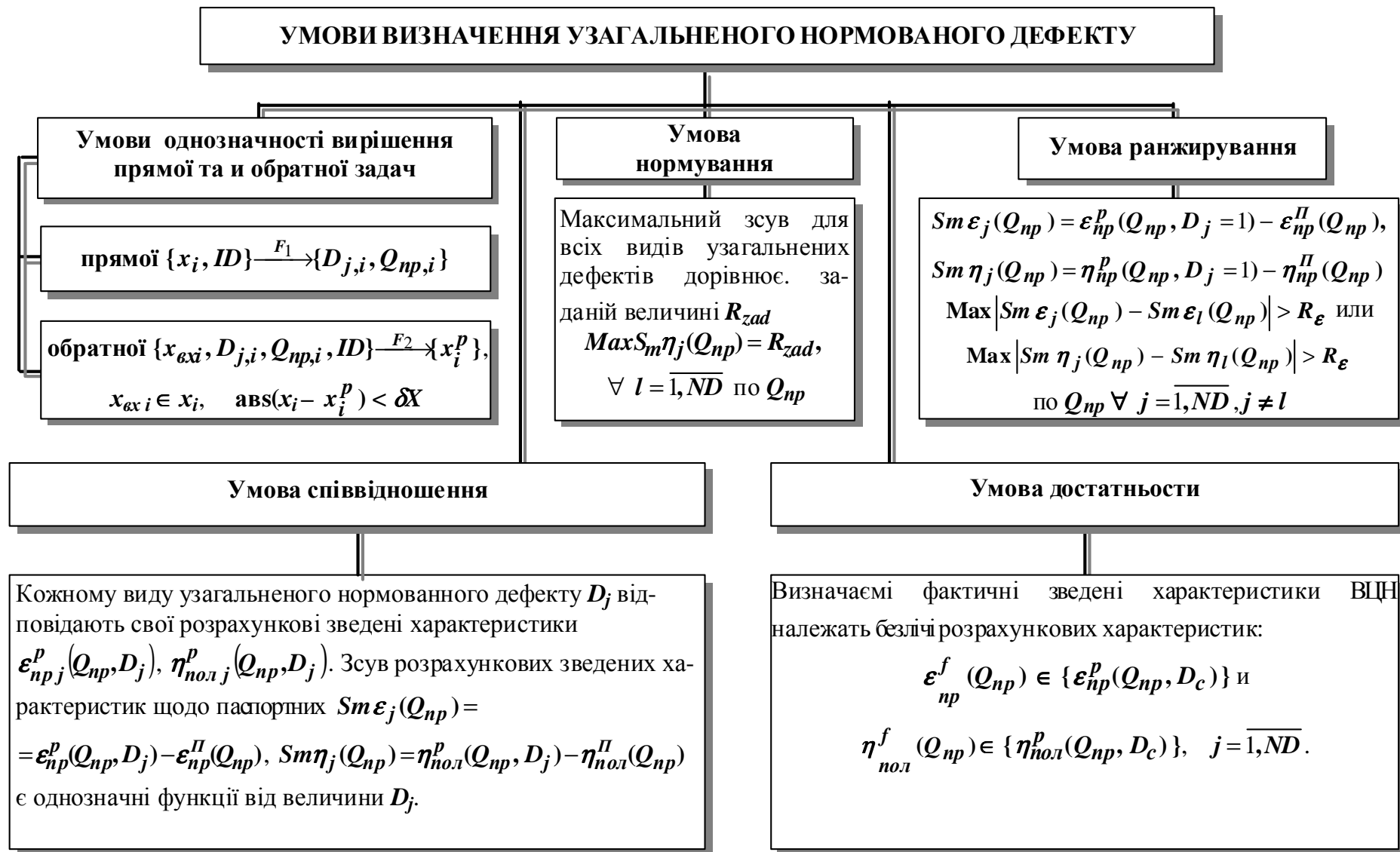


Рис.3.1 Умови визначення узагальненого нормованого дефекту ВЦН

параметрами  $\delta\epsilon_{\max j}$  і  $\delta\eta_{\max j}$  на правому кінці при  $Q_{np} = Q_{\max}$  для  $D_j = 1$ . Тут  $Q_{\min}$ ,  $Q_{\max}$  – паспортні значення мінімальної і максимальної продуктивності ВЦН. При цьому конкретні величини зсувів є лінійними функціями  $Q_{np}$  и  $D_j$

$$\epsilon_{np j}^p(Q_{np}, D_j) - \epsilon_{np}^n(Q_{np}) = \left( \frac{\delta\epsilon_{\max j} - \delta\epsilon_{\min j}}{Q_{\max j} - Q_{\min j}} \cdot (Q_{np} - Q_{\min}) + \delta\epsilon_{\min} \right) \cdot D_j,$$

$$\eta_{пол j}^p(Q_{np}, D_j) - \eta_{пол}^n(Q_{np}) = \left( \frac{\delta\eta_{\max j} - \delta\eta_{\min j}}{Q_{\max j} - Q_{\min j}} \cdot (Q_{np} - Q_{\min}) + \delta\eta_{\min} \right) \cdot D_j.$$

Графічне зображення паспортних і розрахункових характеристик наведено на рис.3.2.

#### **Умова достатності.**

Визначувані фактичні зведені характеристики ВЦН  $\epsilon_{np}^f(Q_{np})$  і  $\eta_{пол}^f(Q_{np})$  належать безлічі розрахункових характеристик обраного дефекту

$$D_c: \epsilon_{np}^f(Q_{np}) \in \{\epsilon_{np}^p(Q_{np}, D_c)\} \text{ і } \eta_{пол}^f(Q_{np}) \in \{\eta_{пол}^p(Q_{np}, D_c)\}.$$

$$D_c \in \{D_i\}, i = \overline{1, ND}$$

#### **Умова ранжирування.**

Вагові коефіцієнти зваженої суми конкретних видів дефектів проточної частини ВЦН, що визначають вид узагальненого нормованого дефекту повинні задовольняти умовам (3.1). Величини зсуву розрахункових характеристик ВЦН щодо паспортних

$$Sm\epsilon_j(Q_{np}) = \epsilon_{np}^n(Q_{np}) - \epsilon_{np j}^p(Q_{np}, D_j = 1)$$

$$Sm\eta_j(Q_{np}) = \eta_{пол}^n(Q_{np}) - \eta_{пол j}^p(Q_{np}, D_j = 1),$$

відповідні  $j$ -му узагальненому нормованому дефекту при  $D_j = 1$ , які відрізняються від відповідних зсувів будь-якого іншого дефекту  $D_l = 1$   $l \neq j$  на константи ранжирування  $R_\epsilon$  и  $R_\eta$

$$\begin{aligned} \text{Max} \left| Sm\epsilon_j(Q_{np}) - Sm\epsilon_l(Q_{np}) \right| &> R_\epsilon \\ \text{за } Q_{np} \\ \text{Max} \left| Sm\eta_j(Q_{np}) - Sm\eta_l(Q_{np}) \right| &> R_\eta. \\ \text{за } Q_{np} \end{aligned} \quad (3.1)$$

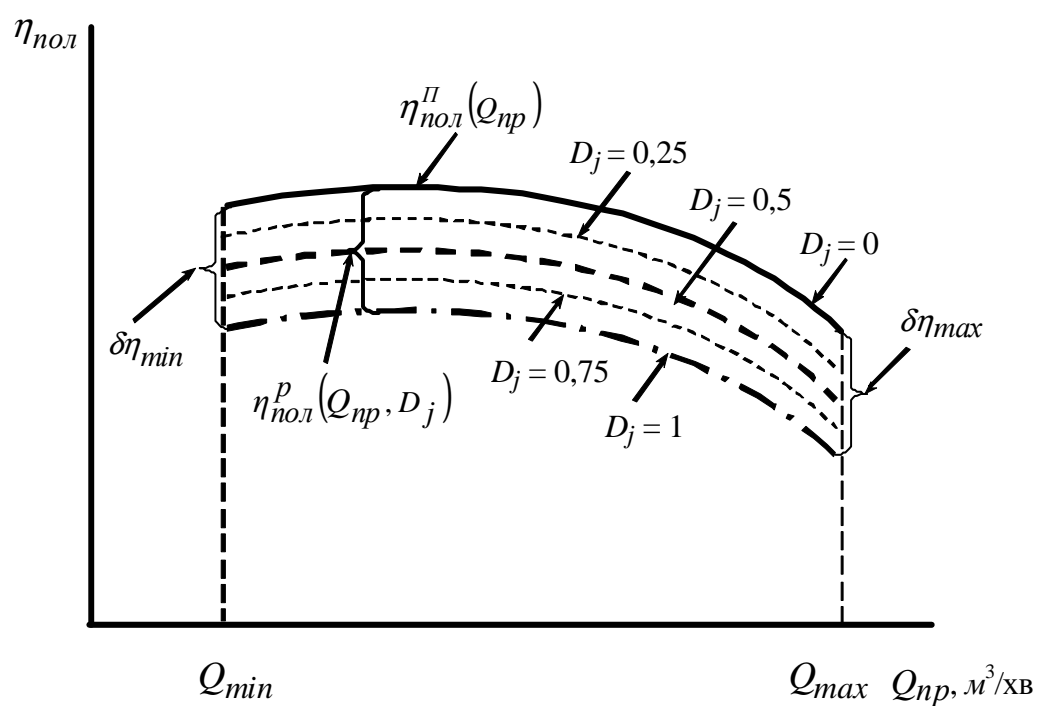
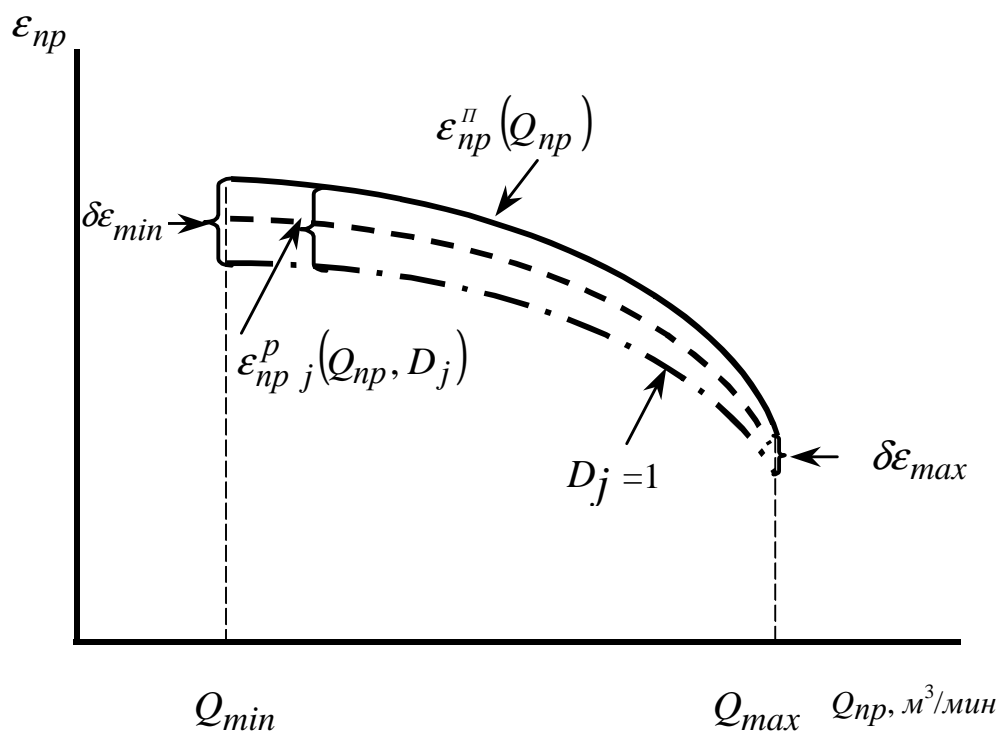


Рис.3.2 – Паспортні та розраховочні характеристики ВЦН

### Умова нормування.

Нормування узагальнених дефектів ВЦН потрібне для критеріального визначення одного виду  $D_c$  з безлічі  $\{D_j\}$ ,  $j = \overline{1, ND}$  відповідно до критерію максимуму вірогідності.

Значенню узагальненого дефекту, що дорівнює 1, відповідають такі втрати за ККД, які є максимальними ( $D_j = 1$ ) для даного типу ВЦН. Максимальний зсув розрахункової характеристики поліропного ККД відносно до відповідної паспортної характеристики для всіх видів узагальнених дефектів дорівнюється заданій величині  $R_{zad}$  для даного типу ВЦН:

$$\text{Max } S_{m\eta_j}(Q_{np}, D_j = 1) = R_{zad}, \text{ для усіх } j = \overline{1, ND}.$$

за  $Q_{np}$

### **Умова однозначності вирішення прямого і зворотнього завдань**

Повинні існувати дві функції однозначного перетворення  $F_1$  і  $F_2$ , що дозволяють відповідно вирішити пряму і зворотню задачі оцінки ФТС ВЦН. При вирішенні прямого завдання повинні визначатися пари значень  $D_{j,i}$  і  $Q_{np j,i}$  за вектором вимірюваних параметрів ВЦН  $x_i$  і його ісходними даними  $ID$

$$\{x_i, ID\} \xrightarrow{F_1} \{D_{j,i}, Q_{np j,i}\}, \forall j = \overline{1, ND}.$$

При вирішенні зворотнього завдання за обчисленими значеннями  $D_{j,i}, Q_{np j,i}$ , а також параметрами ВЦН на його вході  $x_{ex i}$  та ісходними даними  $ID$ , повинні визначатися розрахункові параметри ВЦН  $x_i^p$ , що задовольняють умові

$$\{x_{ex i}, D_{j,i}, Q_{np j,i}, ID\} \xrightarrow{F_2} \{x_i^p\},$$

$$x_{ex i} \in x_i, \quad \text{abs}(x_i - x_i^p) < \delta X,$$

де  $\delta X$  – вектор гранично припустимих відхилень розрахункових параметрів щодо вимірюваних.

## **3.2. МЕТОД ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ НА ОСНОВІ ВИЗНАЧЕННЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО НОРМОВАНОГО ДЕФЕКТУ**

Опис даного методу представлено в роботах [6, 22, 24].



На основі масивів векторів вимірів  $\{X_i\}$ ,  $X_i = \{T_{ex\ i}, T_{vix\ i}, P_{ex\ i}, P_{vix\ i}, n_i, P_{a\ i}, \rho_i\}$   $i = \overline{1, NI}$  ( $NI$  – кількість вимірів), виходячи з критерію максимуму вірогідності оцінки, необхідно зробити оцінку ФТС ВЦН, що включає:

- вид і величину узагальненого нормованого дефекту  $D_c$  (далі по тексту, за винятком випадків, коли необхідно підкреслити нормований дефект, слово "нормований" у визначенні "узагальнений нормований дефект" опущене);
- фактичні зведені характеристики ВЦН, положення яких однозначно визначається  $D_c$ .

Розроблювальний метод оцінки ФТС повинен задовольняти сформульованим у розділі 3.1 системним принципам: єдності, цілісності й ефективності.

Вихідною інформацією для розробки методу є паспортні характеристики ВЦН, математичні моделі й експериментальні дані про зміну приведених характеристик ВЦН у функції від дефектів проточної частини.

Для опису методу використовують наступні визначення.

Справний ВЦН - ВЦН з наявністю дефектів проточної частини, величина і швидкість зміни яких не перевищують припустимі межі.

Несправний ВЦН - ВЦН з наявністю дефектів проточної частини, величина хоча б одного з яких перевищує припустиму межу.

ВЦН, що вимагає перевірки - ВЦН із наявністю дефектів проточної частини, величини яких не перевищують, а швидкість зміни хоча б одного з них перевищує припустимі межі.

Крім раніше введених у розгляд двох типів приведених характеристик ВЦН (паспортної і фактичної), доцільно ввести ще один тип характеристик - дійсні фактичні. Ці характеристики визначають значеннями конкретних дефектів на момент виміру параметрів ВЦН і призначені для обчислення вірогідності і точності фактичних зведених характеристик. Дійсні фактичні характеристики розраховуються за допомогою тієї ж газодинамічної моделі, що

й інші зведені характеристики при нульових похибках каналів вимірів параметрів ВЦН.

Похибки розрахунку фактичних зведених характеристик оцінюють щодо дійсних фактичних за зведеною мірою стискання і політропним ККД у функції від зведеної об'ємної продуктивності.

Описуваний метод спирається на визначення кінцевої безлічі узагальнених дефектів проточної частини  $\{D_j\} \quad j = \overline{1, ND}$  і визначенні для кожного елемента цієї безлічі (виду узагальненого дефекту) пари розрахункових зведених характеристик: зведеної міри стискання і політропного ККД у функції від величини цього виду дефекту і зведеної об'ємної продуктивності

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_{np}^p(D_j, Q_{np}), \quad (3.2)$$

$$\eta_{пол} = \eta_{пол}^p(D_j, Q_{np}). \quad (3.3)$$

Для кожного виміру параметрів  $X_i$ , використовуючи газодинамічний розрахунок параметрів компримування ВЦН обчислюють значення політропного ККД  $\eta_{пол}(X_i)$  і зведеної міри стискання нульового наближення  $\varepsilon_{np}^0(X_i)$  при  $Q_{np}$  рівному  $0,5 \cdot (Q_{np \min} + Q_{np \max})$ , де  $Q_{np \min}$ ,  $Q_{np \max}$  – мінімальне і максимальне значення діапазону зміни  $Q_{np}$ .

Потім, для кожного виду узагальненого дефекту  $D_j$  на основі розрахункових зведених характеристик за допомогою методу послідовних наближень розв'язують систему рівнянь

$$\begin{cases} \varepsilon_{np}^s(X_i) = f_\varepsilon(X_i, Q_{np}^s, j) \\ \varepsilon_{np}^s(X_i) = \varepsilon_{np}^p(D_{i,j}^s, Q_{np}^s, j) \\ \eta_{пол}(X_i) = \eta_{пол}^p(D_{i,j}^s, Q_{np}^s, j) \end{cases}, \quad (3.4)$$

де  $s$  – номер наближення,

$f_\varepsilon$  – функція, що визначає залежність зведеної міри стискання від вектору змін  $X_i$  і зведеної об’ємної продуктивності.

Система рівнянь (3.4) розв’язана і визначені значення

$$D_{i,j}(X_i) = D_{i,j}^s, \quad Q_{np\ i,j}(X_i) = Q_{np\ i,j}^s$$

якщо

$$\begin{aligned} |D_{i,j}^s - D_{i,j}^s| &< \delta D, \\ |Q_{np\ i,j}^s - Q_{np\ i,j}^s| &< \delta Q_{np}, \end{aligned}$$

де  $\delta D$  і  $\delta Q_{np}$  – константи, що визначають потрібну точність рішення системи рівнянь (3.4. ).

У результаті розв’язання цієї системи рівнянь формується масив значень узагальнених дефектів  $\{D_{i,j}(X_i)\}$   $i = \overline{1, NI}$ ,  $j = \overline{1, ND}$ .

Вирішення системи (3.4. ) може не існувати за наступних причин:

- похибка одного або більш каналів виміру параметрів ВЦН перевищує припустимі межі;
- сполучення похибок каналів виміру температури і тиску газу на вході і виході нагнітача такі, що обчислені значення  $\varepsilon_{np}^s(X_i)$  і  $\eta_{пол}(X_i)$  лежать поза області величин, що визначають розрахунковими зведеними характеристиками;
- узагальнений дефект, для якого знаходиться вирішення системи (3.4) істотно відрізняється від відомих конкретних дефектів проточної частини.

Після обчислення масивів значень узагальнених дефектів для всієї серії вимірів  $\{D_{i,j}(X_i)\}$   $j = \overline{1, ND}$ ,  $i = \overline{1, NI}$  здійснюється критеріальний вибір узагальненого дефекту  $D_c$  з безлічі  $\{D_j\}$   $j = \overline{1, ND}$ , що забезпечує максимум вірогідності оцінки ФТС.

Як міру об’єктивної відповідності, що характеризує вірогідність, обрана функція відхилення обчисленого значення узагальненого дефекту  $D_{i,j}(X_i)$  від

його розрахункового значення  $D_{i,j}^r$ . Розрахункове значення узагальненого дефекту  $D_{i,j}^r$  визначається на основі статистичного аналізу результатів обчислення значень  $j$ -го виду дефекту на всьому тимчасовому інтервалі виміру параметрів ВЦН. Максимум вірогідності оцінки ФТС досягається при мінімізації середньоквадратичного відхилення, обчисленого по серії вимірів. При цьому вид узагальненого дефекту  $D_c$  обирають з умов

$$\sum_{i=1}^{NI} (D_{i,c}(X_i) - D_{i,c}^r)^2 < \sum_{i=1}^{NI} (D_{i,j}(X_i) - D_{i,j}^r)^2, \quad (3.5)$$

для  $j = 1, \dots, c-1, c+1, \dots, ND$  при виконанні умов

$$VD_{\min} < VD_c < VD_{\max} \quad \text{и} \quad D_{\min} < D_c(T_{\text{сер}}) < D_{\max},$$

де  $VD_c$  – середня за серією вимірювань швидкість вимірювань узагальненого дефекту,

$D_c(T_{\text{сер}})$  – математичн очікування узагальненого дефекту  $D_c$  для серії вимірів,

$VD_{\min}$ ,  $VD_{\max}$ ,  $D_{\min}$ ,  $D_{\max}$  – межі, що відокремлюють для справного ВЦН зміни швидкості і величини узагальненого дефекту.

У процесі статистичного аналізу масивів  $\{D_{i,j}(X_i)\}$   $i = \overline{1, NI}$ ,  $j = \overline{1, ND}$  можливі випадки, коли оцінювані середні значення швидкості зміни узагальнених дефектів або їхньої величини (по двох або трьох видах), у яких значення середньоквадратичних відхилень менше ніж в інших видів узагальнених дефектів перевищують припустимі межі. У цьому випадку формується повідомлення про необхідність перевірки (калібрування) каналів виміру параметрів ВЦН або про необхідність ремонту проточної частини ВЦН, якщо погрішності каналів виміру не перевищують значень, обговорених технічними умовами на ці канали.

Фактичні зведені характеристики ВЦН визначають на основі розрахункових зведених характеристик і розрахункового значення обраного узагальненог дефекту  $D_{i,c}^r$ :

$$\varepsilon_{np}^f(Q_{np}) = \varepsilon_{np}^p(Q_{np}, D_{i,c}^r), \quad (3.6)$$

$$\eta_{пол}^f(Q_{np}) = \eta_{пол}^p(Q_{np}, D_{i,c}^r). \quad (3.7)$$

Третя фактична зведена характеристика  $\left(\frac{N}{\rho}\right)_{np}^f(Q_{np})$  – зведена внутрішня

відносна потужність, яку розраховують за характеристиками  $\varepsilon_{np}^f(Q_{np})$  и  $\eta_{пол}^f(Q_{np})$  у співвідношенні до газодинамічної моделі, що використовується.

Наявність трьох фактичних зведених характеристик ВЦН дозволяє за поточним вектором вимірів параметрів нагнітача визначити всю номенклатуру режимних параметрів ВЦН, а, отже, і всі режимні параметри КЦ.

### **3.2.1. Метод діагностування функціонально-технічного стану відцентрових нагнітачів за одиничним вектором штатних вимірювань і за серією вимірювань**

*Метод діагностування за одиничним вектором штатних вимірювань*

Процедуру визначення фактичних характеристик [12] виконують незалежно по кожнім ВЦН. Для кожного вектора вимірів  $X_i$  і кожного виду узагальненого дефекту  $D_j$ , розв'язуючи систему рівнянь (3.4), обчислюють значення зведеної об'ємної продуктивності  $Q_{np\ i,j}$  і значення узагальненого дефекту  $D_{i,j}$ .

Нижче наведена обчислювальна схема розв'язання рівнянь (3.4).

Зведена міра стиснення і політропний ККД розраховують на основі політропного методу Шульца з використанням модифікованого рівняння стану "Бенедикта-Вебба-Рабіна" [61]:

$$\varepsilon_{np}^s(X_i) = \left( \frac{m_{v_H}(Q_{np\ i,j}^{s-1}) \cdot H_{n_{np}}}{Z_{np} \cdot R_{np} \cdot T_{ex\ np}} + 1 \right)^{\frac{1}{m_{v_H}(Q_{np\ i,j}^{s-1})}}, \quad (3.8)$$

$$\eta_{пол}(X_i) = \frac{K-1}{K} \cdot \frac{1}{m_T(X_i)}, \quad (3.9)$$

$$H_{n_{np}} = H_n(X_i) \cdot \left( \frac{n_H}{n_i} \right)^2, \quad (3.10)$$

$$H_n(X_i) = \frac{Z_{ex\ i} \cdot R \cdot T_{ex\ i}}{m_v(X_i)} \left( \left( \frac{P_{в\ i} + P_{a\ i}}{P_{ex\ i} + P_{a\ i}} \right)^{m_v(X_i)} - 1 \right), \quad (3.11)$$

$$m_v(X_i) = \lg \left( \frac{Z_{в\ i} \cdot T_{в\ i}}{Z_{ex\ i} \cdot T_{ex\ i}} \right) / \lg \left( \frac{P_{в\ i} + P_{a\ i}}{P_{ex\ i} + P_{a\ i}} \right), \quad (3.12)$$

$$\frac{K-1}{K} = \frac{Z_{cp\ i} \cdot R_i}{C_{p\ cp\ i} - Z_{cp\ i} \cdot R \cdot V_{cp\ i} \cdot m_T^{-1}(X_i)}, \quad (3.13)$$

$$m_T(X_i) = \lg \left( \frac{T_{в\ i}}{T_{ex\ i}} \right) / \lg \left( \frac{P_{в\ i} + P_{a\ i}}{P_{ex\ i} + P_{a\ i}} \right), \quad (3.14)$$

$$R = \frac{1,204 \cdot R_{возд}}{\rho_i}, \quad (3.15)$$

де індекси:

$s$  – номер наближення,

$np$ ,  $n$ ,  $cp$  – відповідно позначають зведене, номінальне або середнє значення параметра.

Слід звернути увагу на те, що входячий у рівняння для обчислення  $\varepsilon_{np}\{X_i\}$  об'ємний коефіцієнт політропи  $m_{v_H}$ , що розраховується для умов зведення, залежить від обчислюваного  $Q_{np\ i,j}$ . Тому процедура розв'язання системи рівнянь (3.4) повинна бути рекуррентною, з послідовним уточненням  $\varepsilon_{np}\{X_i\}$  на поточному кроці за значенням  $Q_{np\ i,j}$  що обчислюють на попередньому кроці.

Розв'язання рівнянь (3.4) знаходиться в площині  $Q_{np}, D_j$ . У загальному випадку визначають три відрізки. Перший відрізок визначається двома точками з координатами  $Q_{np}(\varepsilon_{np}\{X_i\}, D_j=D_z), D_j=D_n$  и  $Q_{np}(\varepsilon_{np}\{X_i\}, D_j=1), D_j=1$ . На першому кроці ітеративного процесу значення нижньої границі дефекту  $D_n$  приймають рівним нулю. Координати  $Q_{np}$  визначають із розрахункової характеристики  $\varepsilon_{npj}^P(Q_{np}, D_j)$ . Два наступних відрізки визначають з розрахункової характеристики  $\eta_{полj}^P(Q_{np}, D_j)$ . Наявність екстремуму цієї характеристики при будь-якому значенні  $D_j$ , і  $\eta_{пол}(X_i) \leq \eta_{\max}$  ( $\eta_{\max}$  – максимальне значення ККД паспортної характеристики) визначає існування двох рішень  $Q_{np}^L(\eta_{пол}(X_i), D_j)$  і  $Q_{np}^R(\eta_{пол}(X_i), D_j)$ , при яких  $\eta_{пол}(X_i) = \eta_{полj}^P(Q_{np}^{L(R)}(\eta_{пол}(X_i), D_j))$ .

Виходячи з наявності цих двох рішень, знаходять другий і третій відрізки:

- другий відрізок має координати кінцевих точок  $Q_{np}^L(\eta_{пол}(X_i), D_j=D_n), D_j=D_n$  и  $Q_{np}^L(\eta_{пол}(X_i), D_j=D_\epsilon), D_j=D_\epsilon$ ;
- третій відрізок має координати кінцевих точок  $Q_{np}^R(\eta_{пол}(X_i), D_j=D_n), D_j=D_n$  и  $Q_{np}^R(\eta_{пол}(X_i), D_j=D_\epsilon), D_j=D_\epsilon$ .

При цьому значення верхньої межі дефекту  $D_\epsilon$  визначають з умов:

$$\eta_{пол}(X_i) \geq \max \eta_{полj}^P(Q_{np}, D_\epsilon) \text{ і } 0 \leq D_n \leq D_\epsilon \leq 1 \text{ при } Q_{\min} \leq Q_{np} \leq Q_{\max}.$$

У процесі визначення координат відрізків і координат точок пересічення першого и другого відрізків  $Q_{np}^L, D_j^L$  і першого і третього відрізків  $Q_{np}^R, D_j^R$  можливі ситуації, при яких наступні обчислювання для вектора  $X_i$  і узагальненого дефекту  $D_j$  припиняються (тобто відсутнє рішення для вектора  $X_i$ ), якщо:

- обчислені значення зведеної міри стискання і/або політропного ККД за вектором вимірювань  $X_i$  перевищують максимально можливі значення

$$\varepsilon_{np}^s(X_i) > \varepsilon_{\max} \quad \text{і/або} \quad \eta_{пол}(X_i) > \eta_{\max},$$

де  $\varepsilon_{\max}$ ,  $\eta_{\max}$  – максимальні значення приведенної ступіні стиску і політропного ККД за паспортними характеристиками;

- координати точок пересічення першого и другого відрізків  $Q_{np}^L, D_j^L$  й першого і третього відрізків  $Q_{np}^R, D_j^R$  не знаходяться у припустимій області

$$Q_{\min}(1 - \delta_q) \leq Q_{np\ i,j}^s \leq Q_{\max}(1 + \delta_q) \quad \text{и} \quad (3.17)$$

$$(D_n - \delta_z) \leq D_{i,j}^s \leq (D_e + \delta_z), \quad s = L, R,$$

де  $\delta_q$ ,  $\delta_z$  – припустимі погрішності обчислення приведенної об'ємної продуктивності  $Q_{np\ i,j}$  і узагальненого дефекту  $D_{i,j}$ .

В разі, якщо одна або дві точки пересічення відрізків лежать в припустимій області (3.17), то виконується наступний крок по уточненню рішення системи рівняння (3.4) за рахунок звуження діапазону  $D_n - D_e$  відносно знайденого значення дефекту  $D_j^R$  або  $D_j^L$ , якщо координати точок  $Q_{np}^R, D_j^R$  лежать поза припустимої області (3.17). Процес уточнення розв'язання рівнянь (3.4) припиняється при відхиленні знайдених значень узагальненого дефекту і зведеної об'ємної продуктивності на поточному кроці від значення на попередньому кроці не більше ніж на задані величини.

Графічна ілюстрація розв'язання системи рівнянь (3.17) визначення значень узагальненого дефекту  $D_{i,j}$  і зведеної об'ємної продуктивності  $Q_{np\ i,j}$  наведена на рис.3.3.

Як відзначалося раніше, для підвищення точності і вірогідності результатів діагностування ГПА в умовах наявності істотних погрішностей штатних каналів виміру параметрів ВЦН і ГТУ необхідно використовувати такий інструмент, як статистичний аналіз, що застосовується, як правило, при неповній і недостовірній вхідній інформації [12].



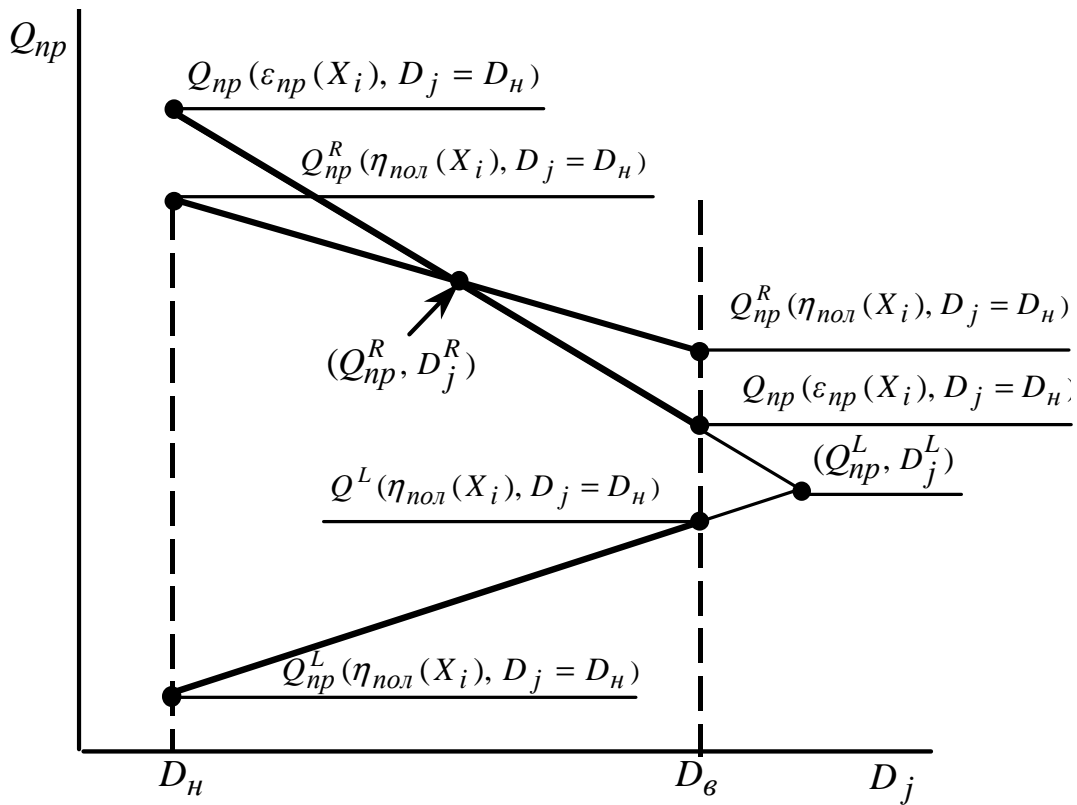


Рис. 3.3 –Значення узагальненого дефекту  $D_{i,j}$  і зведеної об'ємної продуктивності  $Q_{np\ i,j}$  для поточного значення вектора вимірювань  $X_i$

Задачами статистичного аналізу ФТС ВЦН є:

- оцінка середньої швидкості зміни і величини кожного виду узагальненого дефекту по вимірах параметрів ВЦН останньої серії;
- розрахунок прогнозованої швидкості зміни узагальненого дефекту справного ВЦН за даними вимірів останніх серій;
- визначення апроксимуючої кривої зміни узагальненого дефекту за даними вимірів останніх серій;
- вибір узагальненого дефекту  $D_c$  з умови максимуму вірогідності оцінки ФТС.

Статистичний аналіз спирається на обробку результатів обчислення узагальнених дефектів у рамках однієї серії вимірів і обробки декількох останніх серій. Такий поділ аналізу дозволяє підвищити оперативність оцінки ФТС при збереженні показників вірогідності. Тривалість одиничної

оброблюваної серії вимірів повинна бути, з одного боку, достатньою для фільтрації випадкових складових погрешностей каналів виміру параметрів ВЦН, а з іншого, по можливості, більш короткою, виходячи з відстеження зміни узагальненого дефекту. Задача відстеження зміни узагальненого дефекту значно спрощується, якщо протягом серії вимірів відхилення фактичного значення узагальненого дефекту від розрахункового (що змінюється пропорційно часу наробітку ВЦН) незначне стосовно інших методичних і інструментальних похибок оцінки ФТС. З метою підвищення оперативності оцінки ФТС, доцільно інтервал між серіями вимірів призначити меншим, ніж тривалість серії. У цьому випадку, частина останніх вимірів попередньої серії враховують як початкові виміри наступної серії. Наприклад, тривалість серії вимірів складає два місяці, а інтервал між серіями – один місяць.

За умов безперервної роботи ВЦН оцінку середньої швидкості зміни узагальненого дефекту  $D_j$  за останньою серією вимірів і його величину  $D_j^0$  визначають виходячі з мінімізації функціоналу:

$$F_{сер j} = \sum_{i=1}^{NI} (D_{i,j} - D_{i,j}^p)^2, \quad (3.18)$$

де  $D_{i,j}^p = D_j^0 + VD_j \cdot t_i$ ,  $D_{i,j}^p$  – прогнозоване значення  $j$ -го узагальненого дефекту при  $i$ -м вимірі параметрів ВЦН,  
 $NI$  – кількість періодичних вимірів параметрів ВЦН в серії,  
 $t_i$  – час наробітку ВЦН від початку серії (доба).

Тривалість серії  $t_{сер}$  визначається як

$$t_{сер} = NI \cdot t_{узм}, \quad (3.19)$$

де  $t_{узм}$  – період між вимірюваннями в серії (доба).

Значення  $D_j^0$  і  $VD_j$  по кожному  $j$ -му виду узагальненого дефекту знаходять з наступної системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial F_{сер j}}{\partial D_j^0} = 0 \\ \frac{\partial F_{сер j}}{\partial VD_j} = 0 \end{cases} \quad (3.20)$$

Для критеріального вибору найбільш ймовірного узагальненого дефекту відповідно до (3.5) прогнозовану швидкість зміни узагальненого дефекту  $s$ -серії виміру доцільно визначати за допомогою лінійного фільтра  $n$ -го порядку

$$\begin{aligned} aFD_j^{(s)} + aFD_j^{(s-1)} + \dots + a_{n+1}FD_j^{(s-n)} = \\ = b_1VD_j^{(s-1)} + b_2VD_j^{(s-2)} + \dots + b_{m+1}VD_j^{(s-m)}, \end{aligned} \quad (3.21)$$

де  $n$  – порядок фільтра,  $m < n$ ,

$s$  – номер серії,

$FD_j^{(s)}$  – прогнозуєма швидкість змінення  $j$ -го узагальненого дефекту  $s$ -ої серії вимірювань,

$a_1, a_{n+1}$  и  $b_1, b_{m+1}$  – коефіцієнти фільтра.

Порядок фільтра визначається співвідношенням методичної помилки, обумовленою неточністю прогнозування середньої швидкості зміни дефекту й інструментальних погрішностей. Чим більше вплив на оцінку ФТС погрішностей каналів виміру, тим нижче слід вибирати порядок фільтра. Розрахункове значення узагальненого дефекту  $D_{i,j}^r$  на  $i$ -ому вимірі  $s$ -ої серії визначається через прогнозуєму швидкість  $FD_j^{(s)}$  при безперервній роботі ВЦН

$$D_{i,j}^r = MD_j(T_{сер})^{(s-1)} + FD_j^{(s)} \cdot i \cdot T_{изм}, \quad (3.22)$$

де  $MD_j(T_{сер})^{(s-1)}$  – розрахункове значення  $j$ -ого узагальненого дефекту на момент закінчення  $s-1$  серії вимірювань, що розраховується за апроксимуючою кривою зміни цього дефекту за останніми серіями.

Формули розрахунку  $D_{i,j}^r$ ,  $FD_j^{(s)}$ ,  $VD_j^{(s)}$  для випадку роботи з вимиканнями ВЦН, у вигляді їхньої очевидності не приводяться. У випадку

виконання ремонту ВЦН, що торкає зміну характеристик проточної частини, вид і величина узагальненого дефекту визначають тільки після накопичення достатнього об'єму нової інформації. Інформацію про  $FD_j^{(s-1)}$  і  $VD_j^{(s-1)}$  за серією вимірів до ремонту не використовують при визначенні  $FD_j^{(s)}$  і  $VD_j^{(s)}$  після ремонту.

Необхідність визначення апроксимуючої кривої зміни узагальненого дефекту за даними останніх серій вимірів у міжремонтний період проточної частини ВЦН обумовлена тією обставиною, що прийнятою схемою обчислення оцінок ФТС (зокрема визначення  $D'_{i,j}$ ) значення узагальнених дефектів між серіями вимірів не згладжуються. Принципово, за аналогією з фільтрацією швидкості зміни узагальненого дефекту, можна було б фільтрувати величини дефектів, що обчислюють. Однак у цьому випадку вага величини узагальненого дефекту, що відповідає останньої серії вимірів значно вище попередніх. До того ж при фільтрації неможливо врахувати (використовувати) накопичену інформацію експериментальних іспитів про зміну дефектів проточної частини ВЦН у часі.

Апроксимуюча крива зміни узагальнених дефектів визначається з використанням стандартних процедур апроксимації кривими заданого виду: на початку експлуатації експонентою, потім лінійною функцією.

Кінцевою операцією статистичного аналізу оцінки ФТС є вибір з безлічі розглядуваних узагальнених дефектів  $\{D_j\}$ ,  $j = \overline{1, ND}$  одного  $D_c$ , виходячи з критерія максимуму вірогідності (3.5) при наявності обмеження на швидкість і величину зміни дефекту. Цей вибір здійснюють по завершенні кожної серії вимірів з певним загрубленням:

- обраний після  $s$ -ої серії вимірів вид дефекту змінюється в тому випадку, якщо зменшення середньоквадратичного відхилення цього узагальненого

дефекту  $\sum_{i=1}^M (D_{i,j}(X_i) - D_{i,j}^r)^2$  відносно середньоквадратичного відхилення

обраного раніш виду узагальненого дефекту за попередніми серіями перевищує величину  $\delta D$  що задається (величина  $\delta D$  менш ніж 10 %);

- у випадку, якщо одночасно по двох і більш видах узагальнених дефектів значення середньоквадратичних відхилень відрізняються не більш ніж на  $\delta D$ , то виходячи з досвіду експлуатації обирають найбільш вірогідний узагальнений дефект. Така ситуація можлива, коли протягом всієї серії вимірів режимні параметри ВЦН змінюються незначно.

### 3.2.2. Метод діагностування функціонально-технічного стану відцентрових нагнітачів при неповноті штатних вимірювань

Аналіз інформації, що надходить в УМГ із КС показує, що по багатьох КС відсутні поагрегатні дані. У той же час цехові дані і номери працюючих на магістралі ГПА по кожній КС обов'язково передаються в УМГ. Для обробки цієї інформації і визначення на її основі ФТС ГПА, що знаходяться в експлуатуванні необхідна розробка методу оцінки ФТС ГПА за цеховими даними.

Добові цехові дані диспетчерської служби є досить інформативними для оцінки ФТС ГПА.

Задача оцінки ФТС за цеховими даними у даній роботі розглядається для рівнобіжної схеми включення ВЦН при виконанні ряду припущень.

Дану задачу вирішують в такий спосіб [30]. На першому етапі для кожного виду узагальненого дефекту  $D_j$ , ( $j = \overline{1, ND}$ ) і кожного ВЦН по всій серії вимірів цехових даних  $\{X_i\}$ ,  $i = \overline{1, NI}$  визначають функції зміни узагальненого дефекту  $\{D_{j,k,i}\}$ ,  $k = \overline{1, NK}$ , які мінімізують функціонал

$$F_1(\{D_{j,k,i}\}) = \frac{1}{NI} \sum_{i=1}^{NI} (T_{\text{вблх},i}^{KЦ\ r}(D_{j,k,i}) - T_{\text{вблх},i}^{KЦ})^2 = \min, \quad (3.23)$$

по  $D_{j,k,i}$ .

де  $k$  – номер працюючого ВЦН,

$НК$  – кількість ВЦН, які працювали при проведенні серії вимірів цехових даних у КЦ,

$T_{\text{вблх},i}^{KЦ\ r}(D_{j,k,i})$  – розрахункове значення температури газу на виході КЦ (до устаткування повітряного охолодження газу),

$T_{\text{вблх},i}^{KЦ}$  – обмірюване значення температури газу на виході КЦ (до устаткування повітряного охолодження газу).

Для відносно нетривалих серій вимірів (кілька кварталів) функції зміни узагальнених дефектів  $D_{j,k,i}$   $k$ -го ВЦН від часу його наработки, що відраховується від початку серії  $t_{k,i}$ , припустимо розглядати як лінійні

$$D_{j,k,i}(t_{k,i}) = D_{j,k}^0 + D_{j,k}^t \cdot t_{k,i}. \quad (3.24)$$

На основі досвіду експлуатації для тривалих серій вимірів (кілька років) функції  $D_{j,k,i}(t_{k,i})$  розглядаються як експоненціальні

$$D_{j,k,i}(t_{k,i}) = D_{j,k}^0 + D_{j,k}^1 (1 - e^{-D_{j,k}^t \cdot t_{k,i}}). \quad (3.25)$$

У формулах (3.24) і (3.25) використані наступні позначення:

$D_{j,k}^0$  – значення узагальненого дефекту  $j$ -ого виду  $k$ -го ВЦН перед початком серії випробувань,

$D_{j,k}^1$ ,  $D_{j,k}^t$  – коефіцієнти, які визначають збільшення узагальненого дефекту у функції часу напрацювання.

Принципово можливий будь-який інший вибір виду функцій зміни узагальненого дефекту від часу наробітку. Описуваний метод не накладає обмежень на вид функцій  $D_{j,k,i}(t_{k,i})$ .

На другому етапі вибирають безліч узагальнених дефектів  $\{D_{c,k}\}$ ,  $k = \overline{1, NK}$  за умови

$$F_1(D_{c,k,i}) \leq F_1(D_{j,k,i}) \text{ для } c \neq l \text{ и } j = 1, 2, \dots, c-1, c+1, \dots, ND, \quad (3.26)$$

і визначають фактичні характеристики усіх ВЦН, що включалися в роботу при проведенні цієї серії цехових вимірювань.

Процедура мінімізації функціоналу  $F_l(D_{j,k,i})$  на першому етапі вирішення задачі однакова для всіх видів узагальнених дефектів. Тому, при наступному описі методу опущений індекс  $j$ , що визначає вид узагальненого дефекту.

Розрахункове значення температури газу у вхідному колекторі компресорного цеху розраховується для кожного цехового виміру на основі наступного рівняння балансу температур

$$T_{\text{вх},i}^{KЦr} = \frac{\sum_{k=1}^{NK} Q_{k,i}^r(D_{k,i}, X_i) \cdot T_{k,i}^r(D_{k,i}, X_i)}{\sum_{k=1}^{NK} Q_{k,i}^r(D_{k,i}, X_i)}, \quad (3.27)$$

де  $Q_{k,i}^r(D_{k,i}, X_i)$  – розрахункове значення комерційної продуктивності  $k$  го ВЦН за  $i$ -м вектором цехових даних  $X_i$

$$X_i = \{P_{\text{вх},i}^{KЦ}, T_{\text{вх},i}^{KЦ}, P_{\text{вх},i}^{KЦ}, T_{\text{вх},i}^{KЦ}, n_i, \rho_i\},$$

$T_{k,i}^r(D_{k,i}, X_i)$  – розрахункове значення температури газу на виході  $k$ -го ВЦН.

У випадку, якщо при проведенні  $i$ -го виміру  $k$ -й ВЦН не працював,  $Q_{k,i}^r(D_{k,i}, X_i) = 0$ ,  $T_{k,i}^r(D_{k,i}, X_i) = 0$ .

Визначення оптимальних функцій узагальнених дефектів ВЦН, що мінімізують функціонал (3.23), пропонується знаходити методом послідовних наближень. Обчислюється коефіцієнт лінеаризації функції  $T_{\text{вх},i}^r$  за визначуваним параметрам функцій узагальнених дефектів ( $\{D_k^0\}, \{D_k^t\}$  або

$\{D_k^0\}, \{D_k^1\}$  і  $\{D_k^t\}$  для  $k=\overline{1, NK}$  в області значень  $Q_{k,i}^r$  і  $D_{k,i}$  попереднього наближення.

Функція  $T_{\text{вблх } i, s}^r$   $s$ -го наближення для лінійної функції узагальнених дефектів має вигляд

$$T_{\text{вблх } i, s}^{KЦ_r} = T_{\text{вблх } i, s-1}^{KЦ_r} + \sum_{k=1}^{NK} \left( \frac{\partial T_{\text{вблх } i}^r}{\partial D_k^0} D_k^0 \right)_s + \sum_{k=1}^{NK} \left( \frac{\partial T_{\text{вблх } i}^r}{\partial D_k^t} \cdot t_{k,i} \right)_s \cdot D_k^t. \quad (3.28)$$

Потім розв'язують систему рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial F_1(D_{k,i})}{\partial D_k^0} = 0 \\ \frac{\partial F_1(D_{k,i})}{\partial D_k^t} = 0 \end{cases} \quad (3.29)$$

для всіх  $k = \overline{1, NK}$  і знаходять уточнені значення узагальнених дефектів.

Процес уточнення параметрів дефектів завершується у випадку, коли величини відхилень усіх параметрів  $s-1$ -го наближення від  $s$ -го не перевищують задану похибку вирішення задачі.

Як початкове наближення значень узагальнених дефектів можна використовувати результати рішення задачі в спрощеній постановці на основі наступного припущення.

Агрегатні узагальнені дефекти мають у рамках цеху властивість аддитивності. Дефект, обчислений за цеховими даними  $i$ -го виміру ( $D_i^r$ ), дорівнюється, з точністю до методичних і інструментальних погрешностей розрахунків  $i$ -го виміру ( $\delta_i$ ), середньому арифметичному агрегатних узагальнених дефектів  $D_{k,i}$ , що розраховані по тому ж виміру:

$$D_i^r = \sum_{k=1}^{NK} a_{k,i} \cdot D_{k,i} + \delta_i, \quad (3.30)$$

де  $a_{k,i} = \frac{1}{n_{k,i}}$  – якщо при проведенні  $i$ -го виміру  $k$ -й ВЦН працював

$n_{k,i}$  – загальна кількість працюючих ВЦН при проведенні  $i$ -ого виміру,

$a_{k,i} = 0$  – в іншому випадку.



Агрегатні узагальнені дефекти при проведенні серії з  $NI$  вимірів визначають з мінімуму середньоквадратичного відхилення похибок розрахунку дефектів  $F_u(D_{k,i})$

$$F_u(D_{k,i}) = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{NI} (\delta_i)^2 = \frac{1}{N_i} \sum_{i=1}^{NI} (D_i^r - \sum_{k=1}^{NK} a_{k,i} \cdot D_{k,i})^2 = \min, \quad (3.31)$$

де  $D_{k,i}$  – значення узагальненого дефекту  $k$ -го ВЦН на  $i$ -у вимірі.

При цьому агрегатні узагальнені дефекти визначають тільки для тих ВЦН, що працювали хоча б один раз під час проведення серії вимірів.

Значення  $D_i^r$  обчислюють за цеховими даними  $i$ -ого виміру на основі розрахункових характеристик, що відповідають даному виду узагальненого дефекту. При цьому розв'язують систему рівнянь

$$\begin{cases} \varepsilon_{np}(X_i) = \varepsilon_{np}^P(Q_{np\ i}, D_i^r) \\ \eta_{пол}(X_i) = \eta_{пол}^P(Q_{np\ i}, D_i^r) \end{cases} \quad (3.32)$$

за допомогою процедури, описаної в розділі 3.1.3 з тією відмінністю, що в якості вектора вимірів  $X_i$  використовують цехові дані, а не агрегатні.

Вибір виду функції зміни  $D_{k,i}$ , як відмічалось раніше, залежить від тривалості аналізованої серії вимірів. Передбачається, що після проведення обробки цехових вимірів даних декількох серій, отримані результати по кожному ВЦН необхідно описати інтерполяційною функцією. Далі наведені формули для визначення лінійних функцій  $D_{k,i}$  та часу напрацювання, що мінімізують функціонал  $F_u$ .

Необхідні значення  $\{D_k^0\}$  и  $\{D_k^t\}$ ,  $k = \overline{1, NK}$  визначають з розв'язання системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial F_u}{\partial D_k^0} = 0 \\ \frac{\partial F_u}{\partial D_k^t} = 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

для  $k = \overline{1, NK}$ .

Розв'язання даної системи може бути представлене як

$$D_L = A_L^{-1} \cdot D_L^c, \quad (3.34)$$

$$\text{де } D_L = \begin{vmatrix} D_1^0 \\ \dots\dots\dots \\ D_k^0 \\ \dots\dots\dots \\ D_{NK}^0 \\ D_1^t \\ \dots\dots\dots \\ D_k^t \\ \dots\dots\dots \\ D_{NK}^t \end{vmatrix},$$

$$\overline{D}_L^c = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{NI} D_i^r \cdot a_{1,i} \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^{NI} D_i^r \cdot a_{k,i} \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^{NI} D_i^r \cdot a_{NK,i} \\ \sum_{i=1}^{NI} D_i^r \cdot a_{1,i} \cdot t_{1,i} \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^{NI} D_i^r \cdot a_{k,i} \cdot t_{k,i} \\ \dots\dots\dots \\ \sum_{i=1}^{NI} D_i^r \cdot a_{NK,i} \cdot t_{NK,i} \end{vmatrix}.$$

$$\begin{aligned}
A_L = & \left| \begin{aligned}
& \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k,i} \cdot a_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot t_{1,i} \cdot a_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k,i} \cdot t_{k,i} \cdot a_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot t_{NK,i} \cdot a_{1,i} \\
& \dots \\
& \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k,i} \cdot a_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot t_{1,i} \cdot a_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k,i} \cdot t_{k,i} \cdot a_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot t_{NK,i} \cdot a_{NK,i} \\
& \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{1,i} \cdot t_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k,i} \cdot a_{1,i} \cdot t_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{1,i} \cdot t_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot t_{1,i} \cdot a_{1,i} \cdot t_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k,i} \cdot t_{k,i} \cdot a_{1,i} \cdot t_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot t_{NK,i} \cdot a_{1,i} \cdot t_{1,i} \\
& \dots \\
& \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{NK,i} \cdot t_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k,i} \cdot a_{NK,i} \cdot t_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{NK,i} \cdot t_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot t_{1,i} \cdot a_{NK,i} \cdot t_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k,i} \cdot t_{k,i} \cdot a_{NK,i} \cdot t_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot t_{NK,i} \cdot a_{NK,i} \cdot t_{NK,i}
\end{aligned} \right|
\end{aligned}$$

Обчислені значення  $\{D_k^0\}$  и  $\{D_k^t\}$ ,  $k = \overline{1, NK}$  перевіряють на виконання наступних умов для всіх  $NK$  ВЦН

$$D_{\min k} \leq D_k^0 < D_{\max k}, \quad (3.35)$$

$$D_k^t \geq 0, \quad (3.36)$$

$$D_k^0 + D_k^t \cdot t_{k, Ni} < D_{\max k}, \quad (3.37)$$

де  $D_{\min k}, D_{\max k}$  – параметри, що визначають діапазон можливої зміни дефекту по  $k$ -ому ВЦН.

Діапазони можливої зміни узагальненого дефекта визначають за результатами обчислень фактичних характеристик ВЦН за попередніми серіями вимірів. Нижнє значення діапазону змінення  $D_{\min k}$  дорівнюється значенню агрегатного дефекту  $k$ -ого ВЦН, знайденого у попередньому вимірі, мінус подвоєне значення можливої помилки обчислення  $D_k$ . Якщо отримане значення  $D_{\min k}$  менше  $-0,05$ , то  $D_{\min k}$  примусово привласнюється значення  $-0,05$ .

$D_{\max k}$  визначається як функція від обчисленого значення дефекту на попередній серії вимірів, можливих помилок обчислень, а також можливої граничної зміни  $D_k$  за час проведення серії вимірів. Якщо отримане значення  $D_{\max k}$  більше ніж 1, то  $D_{\max k}$  примусово присвоюється значення 1.

У разі невиконання хоча б по одному ВЦН одного або кількох умов (3.35), (3.36), (3.37), виконуються наступні дії:

при невиконанні умов (3.35) по  $k$ -у ВЦН значенню  $D_k^0$  привласнюється  $D_{\text{пред } k}$ , що розраховують як

$$D_{\text{пред } k} = D_{\min k}, \text{ при } D_k^0 < D_{\min k}, \quad (3.38)$$

$$D_{\text{пред } k} = D_{\max k}, \text{ при } D_k^0 > D_{\max k}.$$

При невиконанні умови (3.36) значенню  $D_k^t$  привласнюється нуль.

При виконанні умов (3.35) і (3.36) і невиконанні умов (3.37)  $D_k^t$  привласнюється значення

$$D_k^t = \frac{D_{\max k} - D_k^0}{t_{k,NI}}. \quad (3.39)$$

Після виконання приведених присвоєнь повторно вирішується система рівнянь (3.33) із зафіксованими значеннями  $D_k^0$  і/або  $D_k^t$ , а потім повторно перевіряється виконання умов (3.35), (3.36), (3.37).

Задача визначення узагальнених дефектів  $D_{k,i}$ , що мінімізують функціонал (3.32), вважається вирішеною, якщо після наступного обчислення  $\{D_k^0\}$  и  $\{D_k^t\}$ ,  $k = \overline{1, NK}$  умови (3.35), (3.36), (3.37) виконані по всіх  $NK$  ВЦН.

У разі, якщо серія з  $NI$  вимірів періодично повторюється на відносно невеликому часовому інтервалі (наприклад 3 місяці), то можна припустити, що  $D_k^t = 0$  и  $D_{k,i} = D_k$ . Тоді вектор значень агрегатних дефектів  $D_w$ , що мінімізує функціонал  $F_u$ , дорівнює

$$D_w = A_w^{-1} \cdot D_w^c, \quad (3.40)$$

$$\text{де } D_w = \begin{vmatrix} D_1^0 \\ \dots \\ D_k^0 \\ \dots \\ D_{NK}^0 \end{vmatrix}, \quad D_w^c = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{NI} D_i^r \cdot a_{1,i} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{NI} D_i^r \cdot a_{k,i} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{NI} D_i^r \cdot a_{NK,i} \end{vmatrix},$$

$$A_w$$

діапазонам можливих змін:

$$D_{\min k} \leq D_k < D_{\max k}. \quad (3.41)$$

значення  $D_k = D_{пред k}$ . При цьому  $D_{пред k} = D_{\min k}$  при  $D_k < D_{\min k}$  або

знаходять з рівняння

$$D_{(1)} = A_{(1)}^{-1} \cdot D_{(1)}^c, \quad (3.42)$$

де

$$A_{(1)} = \left| \begin{array}{c} \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{2,i} \cdot a_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k-1,i} \cdot a_{1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{k+1,i} \cdot a_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{1,i} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{k-1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{2,i} \cdot a_{k-1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k-1,i} \cdot a_{k-1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{k+1,i} \cdot a_{k-1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{k-1,i} \\ \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{k+1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{2,i} \cdot a_{k+1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k-1,i} \cdot a_{k+1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{k+1,i} \cdot a_{k+1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{k+1,i} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{NK,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{2,i} \cdot a_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k-1,i} \cdot a_{NK,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{k+1,i} \cdot a_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{NK,i} \end{array} \right|$$

За результатами розв'язання (3.42) аналізують виконання умови (3.41).

При невиконанні цієї умови по одному або декільком ВЦН фіксується значення узагальненого дефекту по  $s$ -му ВЦН  $D_s = D_{s,пред}$ , у якого модуль відхилення значення  $D_s$  від граничного  $D_{s,пред}$  максимальний. Далі визначають значення узагальнених дефектів другого наближення

$$\underline{D}_{(2)} = A_{(2)}^{-1} \cdot D_{(2)}^c, \quad (3.43)$$

де

$$D_{(2)} = \begin{vmatrix} D_1 \\ \dots \\ D_{s-1} \\ D_{s+1} \\ \dots \\ D_{k-1} \\ D_{k+1} \\ \dots \\ D_{NK} \end{vmatrix}, \quad D_{(2)}^c = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^{NI} (D_i^r - a_{k,i} \cdot D_{k,npe\partial} - a_{s,i} \cdot D_{s,npe\partial}) \cdot a_{1,i} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{NI} (D_i^r - a_{k,i} \cdot D_{k,npe\partial} - a_{s,i} \cdot D_{s,npe\partial}) \cdot a_{s-1,i} \\ \sum_{i=1}^{NI} (D_i^r - a_{k,i} \cdot D_{k,npe\partial} - a_{s,i} \cdot D_{s,npe\partial}) \cdot a_{s+1,i} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{NI} (D_i^r - a_{k,i} \cdot D_{k,npe\partial} - a_{s,i} \cdot D_{s,npe\partial}) \cdot a_{k-1,i} \\ \sum_{i=1}^{NI} (D_i^r - a_{k,i} \cdot D_{k,npe\partial} - a_{s,i} \cdot D_{s,npe\partial}) \cdot a_{k+1,i} \\ \dots \\ \sum_{i=1}^{NI} (D_i^r - a_{k,i} \cdot D_{k,npe\partial} - a_{s,i} \cdot D_{s,npe\partial}) \cdot a_{NK,i} \end{vmatrix},$$

$$\begin{aligned}
A_{(2)} = & \left| \begin{array}{l}
\sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{2,i} \cdot a_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{s-1,i} \cdot a_{1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{s+1,i} \cdot a_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k-1,i} \cdot a_{1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{k+1,i} \cdot a_{1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{1,i} \\
\hline
\sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{s-1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{2,i} \cdot a_{s-1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{s-1,i} \cdot a_{s-1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{s+1,i} \cdot a_{s-1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k-1,i} \cdot a_{s-1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{k+1,i} \cdot a_{s-1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{s-1,i} \\
\sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{s+1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{2,i} \cdot a_{s+1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{s-1,i} \cdot a_{s+1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{s+1,i} \cdot a_{s+1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k-1,i} \cdot a_{s+1,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{k+1,i} \cdot a_{s+1,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{s+1,i} \\
\hline
\sum_{i=1}^{NI} a_{1,i} \cdot a_{NK,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{2,i} \cdot a_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{s-1,i} \cdot a_{NK,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{s+1,i} \cdot a_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{k-1,i} \cdot a_{NK,i} + \sum_{i=1}^{NI} a_{k+1,i} \cdot a_{NK,i} + \dots + \sum_{i=1}^{NI} a_{NK,i} \cdot a_{NK,i}
\end{array} \right|.
\end{aligned}$$



Процедура обчислень узагальнених дефектів повторюється до тих пір, поки всі знайдені значення узагальнених дефектів, мінімізують функцію середньоквадратичних помилок обчислень (3.42), будуть задовольняти умові (3.41). Завершальною операцією з визначення індивідуальних оцінок ФТС ВЦН є апроксимація значень узагальнених дефектів по кожному ВЦН за всіма серіями вимірів. Фактичні зведені характеристики ВЦН визначають відповідно до (3.6) і (3.7). Значення узагальненого дефекту встановлюють за апроксимуючою прямою (кривою) на момент закінчення останньої серії вимірів.

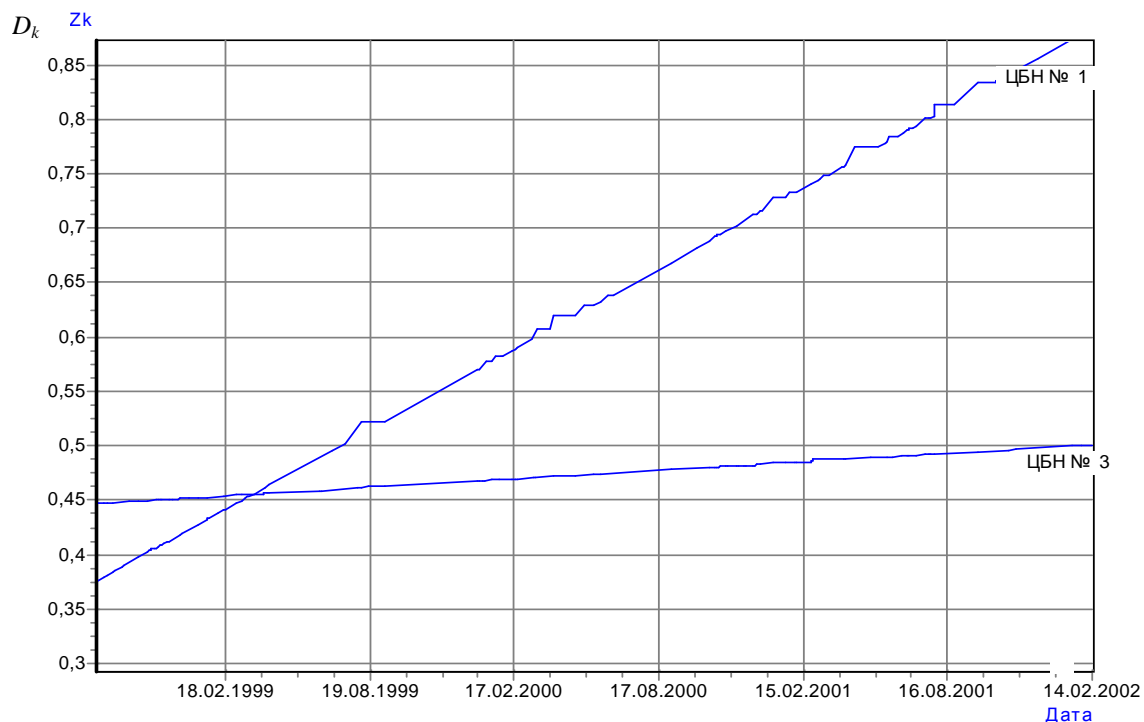


Рис.3.4 – Зміна узагальнених дефектів ВЦН КС “Олександрівка” за часом

На рис.3.4 наведений приклад графіків змін індивідуальних узагальнених дефектів ВЦН по КС "Олександрівка", розрахованих за цеховими даними за період: січень 1999 року - лютий 2003 року.

Аналізуючи рис.3.3, можна відзначити, що знос проточної частини ВЦН № 1 стосовно ВЦН № 3 значно більше і викликає зниження фактичного політропного ККД стосовно паспортного значення на величину порядку  $8 \div 10$

% (максимальний зсув розрахункової характеристики політропного ККД щодо відповідної паспортної дорівнює 11 % при  $D_j = 1$ ).

### ***3.2.3. Оцінка вірогідності результатів діагностування***

Вірогідність визначених оцінок функціонально-технічного стану встановлюють за результатами натурних випробувань ВЦН в умовах компресорних станцій і математичного моделювання ВЦН із різними видами дефектів проточної частини.

Залежно від виду визначення оцінки ФТС під час натурних випробувань ВЦН підрозділяються на прямі і непрямі.

При виконанні випробувань з визначенням прямих оцінок безпосередньо оцінюють дефекти на відкритому для проведення ремонту нагнітачі. За обмірюваними конкретними дефектами (зазор в ущільненні покривного диску, ерозія лопаткового апарата і т.п.) обчислюють вид і величину узагальненого дефекту. Результати обчислень узагальненого дефекту порівнюють з оцінками ФТС, отриманими на момент вимикання ВЦН перед ремонтом. При істотних відмінностях в оцінках дефектів з'ясовують причини розходжень.

Вірогідність непрямих оцінок ФТС визначають за результатами випробувань в умовах КС, на виході яких вимірюється комерційна продуктивність КЦ. На основі фактичних зведених характеристик працюючих ВЦН, для обмеженої серії вимірів параметрів ВЦН, обчислюють комерційну продуктивність кожного нагнітача і середню по КЦ. Середню розрахункову комерційну продуктивність КЦ порівнюють із середньою обмірюваною комерційною продуктивністю КЦ за час випробувань.

У табл.3.1 наведені оперативні вхідні дані для розрахунку режимних параметрів ВЦН і подані розрахункові значення комерційної продуктивності ВЦН і їх похибки щодо обмірюваних на КС з ВЦН PCL-804-2/36 і приводом ГТН-25І (Цех 1), а також з ВЦН Н-235-21-1 і приводом ГПУ-10 (Цех 2).

Таблиця 3.1 – Оцінка похибки розрахунку режимних параметрів ВЦН

№ изм	№ ВЦН	Дата	$P_{\text{вх}}$	$P_{\text{вых}}$	$t_{\text{вх}}$	$t_{\text{вых}}$	$\rho$	$n$	Комерційна продуктивність по КЦ		Відносна похибка, %
									вимір яна	розрахо- вана	
			$\frac{\text{кгс}}{\text{с}} \cdot \text{м}^2$	$\frac{\text{кгс}}{\text{с}} \cdot \text{см}^2$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\frac{\text{об}}{\text{м}} \cdot \text{ин}$	$\text{млн.м}^3/\text{сут}$		
Цех 1 ВЦН PCL-804-2/36 привод ГТН-25I											
1	1	02.10.02	51,6	68,4	28	53	0,68	4025	47,82	46,91	-1,89
2	1	02.10.02	49,8	65,1	28	52	0,68	4025	48,55	48,51	-0,09
3	1	04.10.02	51,2	66,7	28	50	0,68	3954	49,69	48,02	-3,35
4	1	05.10.02	51,0	65,0	28	50	0,68	4004	52,84	51,92	-1,74
5	1	06.10.02	50,8	64,5	28	50	0,68	4004	52,66	51,71	-1,81
Середня за цикл вимірів									50,31	49,41	-1,78
Цех 2 ВЦН Н-235-21-1 привод ГПУ-10											
1	1	17.11.02	52,97	68,60	19	43	0,68	4629	73,17	71,25	-2,63
	4	17.11.02	53,35	68,46	19	43		4598			
	6	17.11.02	54,61	67,70	19	43		4653			
2	1	18.11.02	51,46	66,53	19	43	0,68	4629	72,00	69,46	-3,52
	4	18.11.02	51,95	66,46	19	43		4598			
	6	18.11.02	53,19	65,63	19	43		4653			
Середня за цикл вимірів									72,59	70,36	-3,07

Як видно з наведених результатів, похибка розрахунку комерційної продуктивності ВЦН не перевищила 4 %. Така точність оцінок ФТС ВЦН є достатньою для вирішення задач керування експлуатацією ГПА.

Найбільш повний аналіз вірогідності оцінок ФТС ВЦН виконують засобами математичного моделювання [49].

Аналізуються наступні фактори, що впливають на вірогідність оцінок ФТС:

- вид і величина узагальненого дефекту;
- систематичні і випадкові похибки каналів виміру і їх взаємкореляція;

- зміна режимних параметрів у процесі оцінки функціонально-технічного стану ВЦН (приведеної об'ємної продуктивності, частоти обертання ротора ВЦН та ін.);
- настроювання алгоритмів оцінки ФТС.

Моделювання розрахунку оцінки ФТС виконують за наступною схемою.

Обирають тип нагнітача і відповідну нормативно-довідкову інформацію.

Визначають безліч узагальнених видів дефектів  $\{D_j\}$ ,  $(j = \overline{1, ND})$  і формують безліч розраховочних характеристик ВЦН  $\varepsilon_{np}^P(Q_{np}, D_j)$   $\eta_{пол}^P(Q_{np}, D_j)$ .

Послідовно, в якості дійсних фактичних характеристик, задають розраховочні характеристики  $\varepsilon_{np}^P(D_{v,j}, Q_{np})$  і  $\eta_{пол}^P(D_{v,j}, Q_{np})$  для  $j$ -го вида узагальненого дефекту, величиною  $D_{v,j} = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$ , а також набори масивів вхідної вимірюваної інформації і масивів систематичних і випадкових похибок каналів вимірів. Масиви вхідної інформації мають інформацію про тиск газу на вході  $P_{вх\ i}$  і виході  $P_{вих\ i}$ , температуру газу на вході  $T_{вх\ i}$ , частоту обертання ротора ВЦН  $n_i$  і густину газу  $\rho_i$ . Кількість модельованих вимірів параметрів в серії  $NI$  перевищує 500 значень. Під час серії вимірів параметри, що моделюють кілька разів незалежно один від одного змінюються. Температуру газу на виході нагнітача  $T_{вих\ i}$  розраховують за дійсними фактичними характеристиками і параметрами, які моделюють  $P_{вх\ i}$ ,  $P_{вих\ i}$ ,  $T_{вх\ i}$ ,  $n_i$ ,  $\rho_i$  для кожного  $i$ -го виміру. Масив векторів вимірів  $\{X_i\}$  формується накладанням на параметри ВЦН систематичних  $\delta_{сист}(y_i)$  і випадкових  $\delta_{случ}(y_i)$  похибок каналів вимірів, де  $y_i = \{P_{вх\ i}, P_{вих\ i}, T_{вх\ i}, T_{вих\ i}\}$ .

Систематичні похибки постійні для всієї серії вимірювань і некорельовані між собою. Випадкові похибки моделюють за допомогою датчика випадкових чисел з нормальним законом розподілу.

ФТС ВЦН оцінюють за результатами обробки серії вимірювань, при цьому порівнюють:

- середню комерційну продуктивність ВЦН з серією вимірів (розраховану за дійсними фактичними характеристиками і параметрами ВЦН без похибок) із середньою комерційною продуктивністю ВЦН (розраховану за фактичними характеристиками і вимірами параметрів з похибками);

- максимальні відхилення фактичних характеристик від дійсних фактичних за приведеним ступенем стиснення і за політропним ККД у модельованій області приведеної продуктивності ВЦН;
- середнє відхилення фактичних характеристик від дійсних фактичних за приведеним ступенем стиснення і політропним ККД.

Ці порівняльні оцінки визначають за всім масивом вхідної інформації, масивом систематичних похибок для кожного виду узагальненого дефекту. Отримані порівняльні оцінки усереднюють і формують підсумкові оцінки відхилення розраховуваних фактичних характеристик від дійсних фактичних для усіх видів узагальнених дефектів. Як ілюстрацію аналізу вірогідності оцінок ФТС нижче наведені результати моделювання ВЦН РС 804-2/36 (рис.3.5. і табл.3.1- 3.5).

Під час аналізу вірогідності оцінок ФТС цього типу ВЦН розглядалися дев'ять видів узагальнених дефектів. Параметри, які характеризують відхилення розрахункових характеристик, що відповідають цим дефектам при  $D_j = 1$  щодо паспортних, наведені в табл.3.1. На рис.3.5 наведено графіки зміни параметрів ВЦН для одного з трьох наборів масивів вхідної вимірюваної інформації і одного з дев'яти наборів масивів похибок каналів вимірювань.

Таблиця 3.1 - Параметри відхилення розрахункових характеристик щодо паспортних при значенні узагальненого дефекту  $D_j = 1$

Вид узагальненог о дефекту	Приведеного ступеня стиснення		Політропного ККД	
	при $Q_{\min} (\%)$	при $Q_{\max} (\%)$	при $Q_{\min} (\%)$	при $Q_{\max} (\%)$
1	1	3	7,5	22,5
2	1	3	15	15
3	1	3	22,5	7,5
4	2	2	7,5	22,5
5	2	2	15	15
6	2	2	22,5	7,5
7	2,5	1	7,5	22,5
8	2,5	1	15	15
9	2,5	1	22,5	7,5

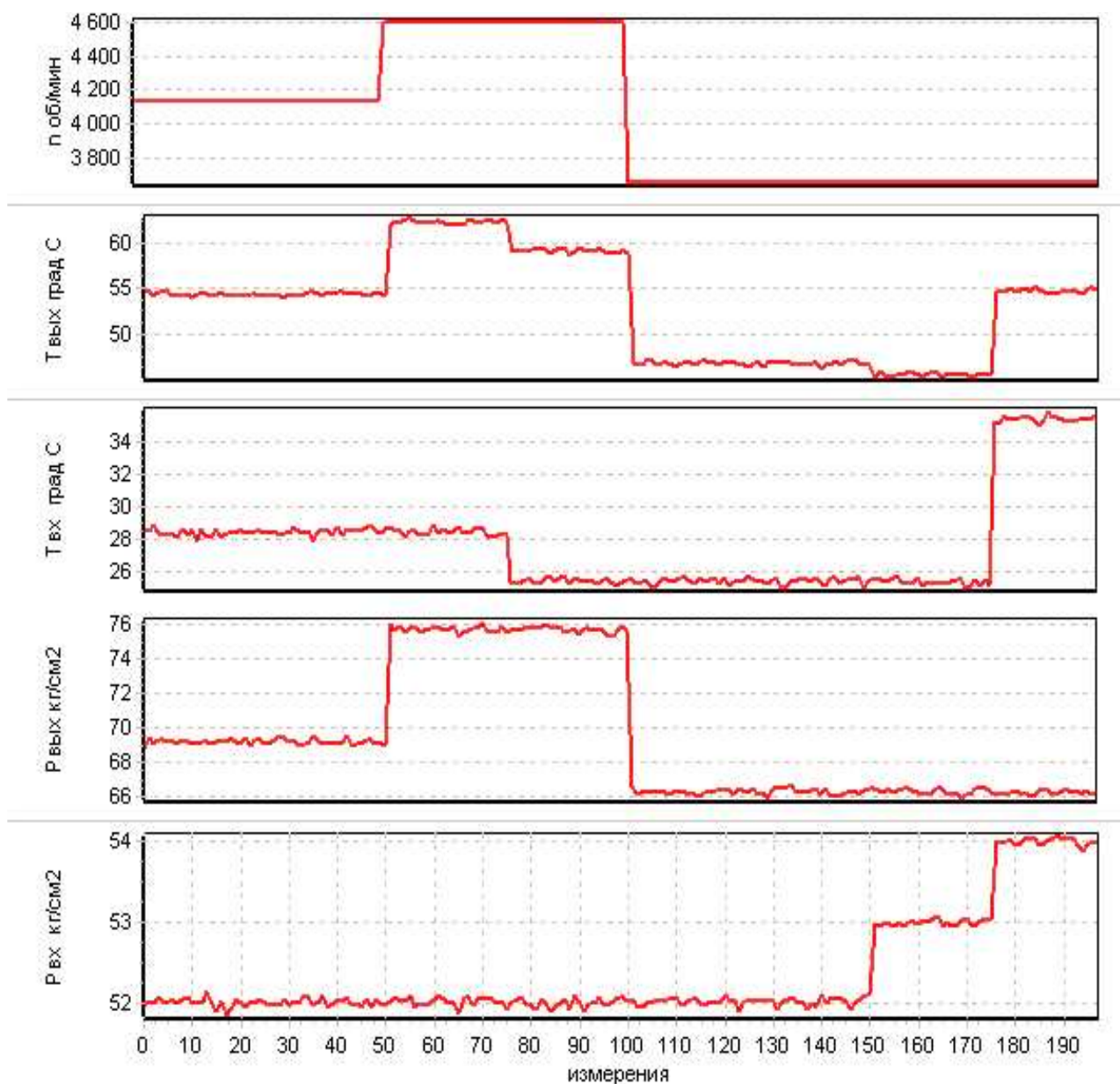


Рис.3.5 - Змінення параметрів ВЦН в модельованій серії вимірів

В табл.3.2 наведені результати визначення ФТС для третього виду узагальненого дефекту величиною  $D_{v,j} = 0,5$  за вхідною інформацією що представлена на рис.3.5. Підсумкові оцінки відхилу розрахованих фактичних від дійсних фактичних характеристик для ВЦН PCL 804-2/36 наведені в табл.3.3.

Таблиця 3.2 – Результати визначення оцінки ФТС за однією серією вимірів

Вид и величина дефекту		Середня комерційна продуктивність				Відхил фактичних характеристик від дійсних в %			
модельовані значення		розраховані значення		модельовані значення	розраховані значення	$\varepsilon_{np}$		$\eta_{пол}$	
вид	величина	вид	величина	млн.м <sup>3</sup> /доб	млн.м <sup>3</sup> /доб	середн.	макс.	серед.	макс.
3	0,5	3	0,47	14,1	13,8	0,31	1,5	2,3	5,6

Таблиця 3.3 - Підсумкові оцінки відхилення розрахованих фактичних характеристик від дійсних фактичних для ВЦН PCL 804-2/36 за всіма серіями вимірів

Загальна кількість серії вимірів	Відхилення фактичних характеристик щодо дійсних в %			
	$\varepsilon_{np\ cr}$	$\varepsilon_{np\ max}$	$\eta_{пол\ cr}$	$\eta_{пол\ max}$
500	0,25	1,8	1,82	7,2

## **4. ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

У даному розділі представлена задача визначення зміни зведених характеристик ГТУ та оцінки їх ФТС в умовах КС [23, 33]. При цьому задача визначення конкретних дефектів її проточної частини, що викликали зміни цих характеристик, не вирішується. Власне, така постановка задачі істотно відрізняється від сформульованих раніше задач параметричної діагностики ГТУ [3, 17, 34].

### **4.1. ОЦІНКА ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВІ УЗАГАЛЬНЕНИХ НОРМОВАНИХ ДЕФЕКТІВ**

Спираючись на сформульовані в розділі 1.2 системні принципи, а також на підходи, що розроблені О. Н. Фаворским у частині параметричної діагностики ГТУ [53], нижче представлений метод оцінки ФТС ГТУ на основі узагальнених нормованих дефектів [22, 24, 30].

Постановка задачі для розробки даного методу формулюється в такий спосіб.

Необхідно визначити оцінку ФТС ГТУ, що містить:

- вид і величину узагальненого нормованого дефекту ГТУ  $Y_c \in \{Y_j\}$   
 $j = \overline{1, NS}$ ;
- фактичні зведені характеристики ГТУ, положення яких відносно до паспортних однозначно визначається  $Y_c$ ;
- КТС на номінальному режимі роботи ГТУ, зведені до станційних умов.

Вихідною інформацією для розробки методу є наступні дані:

- паспортні характеристики ГТУ, що містять:
- універсальну характеристику ГТУ у вигляді залежності потужності і ККД ГТУ від частот обертання роторів турбіни високого тиску (ТВТ) і силової



турбіни (СТ) або у вигляді залежності тільки потужності ГТУ від частот обертання роторів ТВТ і СТ. Характеристики ККД ГТУ наводяться тільки для номінального режиму. На рис.4.1 наведений загальний вид універсальної характеристики ГТУ;

- дросельну характеристику, представлену у вигляді залежності витрат паливного газу, температури продуктів згоряння за турбіною низького тиску (ТНТ) і тиску за осьовим компресором від частоти обертання ротора ТВТ або залежність потужності ГТУ, частот обертання роторів ТВТ і ТНТ, витрат паливного газу, температури продуктів згоряння за ТНТ від ступеня підвищення тиску в компресорі. На рис.4.2 наведений загальний вид дросельної характеристики;
- характеристику впливу гідравлічних втрат у вхідному і вихідному пристроях на значення потужності і ККД ГТУ (наведена на рис.4.3);
- результати приймально-здавальних випробувань ГТУ на стенді заводу-виготовлювача і приймальних випробувань на КС у виді уточненої дросельної характеристики ГТУ;
- інформація про наробіток ГТУ і проведення ремонтів;
- характеристики, що відображують залежність змін контрольованих параметрів від виду і величини узагальненого дефекту і базового параметра (ступеня підвищення тиску повітря в компресорі або частоти обертання ротора ТВТ або ін.). На рис. 4.4 і 4.5 наведений загальний вигляд характеристик, що відображують зміни температури продуктів згоряння за турбіною низького тиску (ТНТ) і частоти обертання ротора ТНТ у залежності від базового параметра і величини узагальненого дефекту;
- розрахункові зведені характеристики потужності і ККД ГТУ у функції узагальнених дефектів  $\{Y_j\}$   $j = \overline{1, NS}$  і базового параметру, як відображено на рис.4.6.

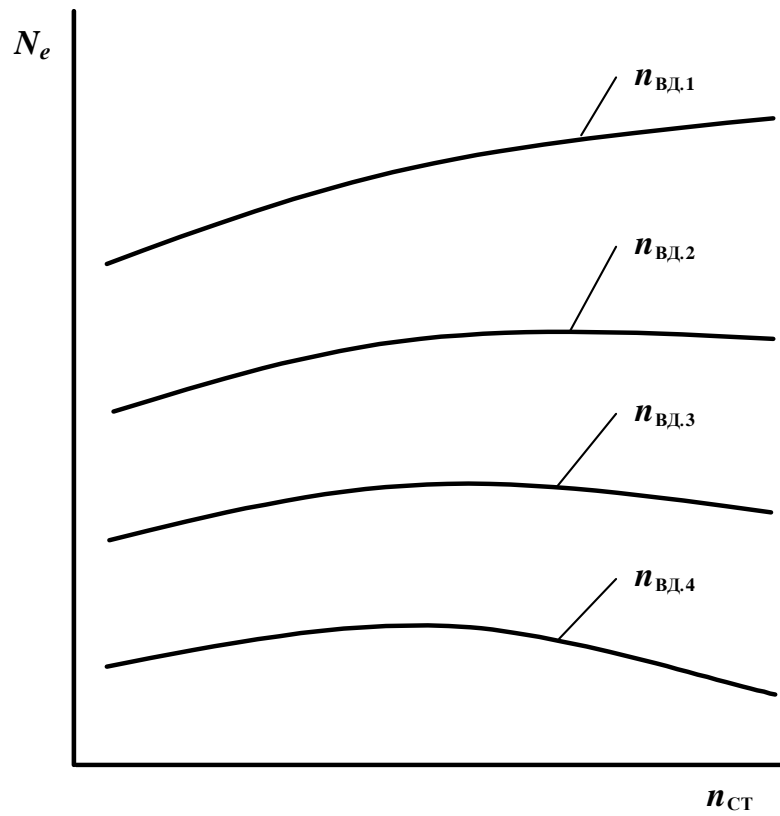


Рис.4.1- Універсальна характеристика ГТУ

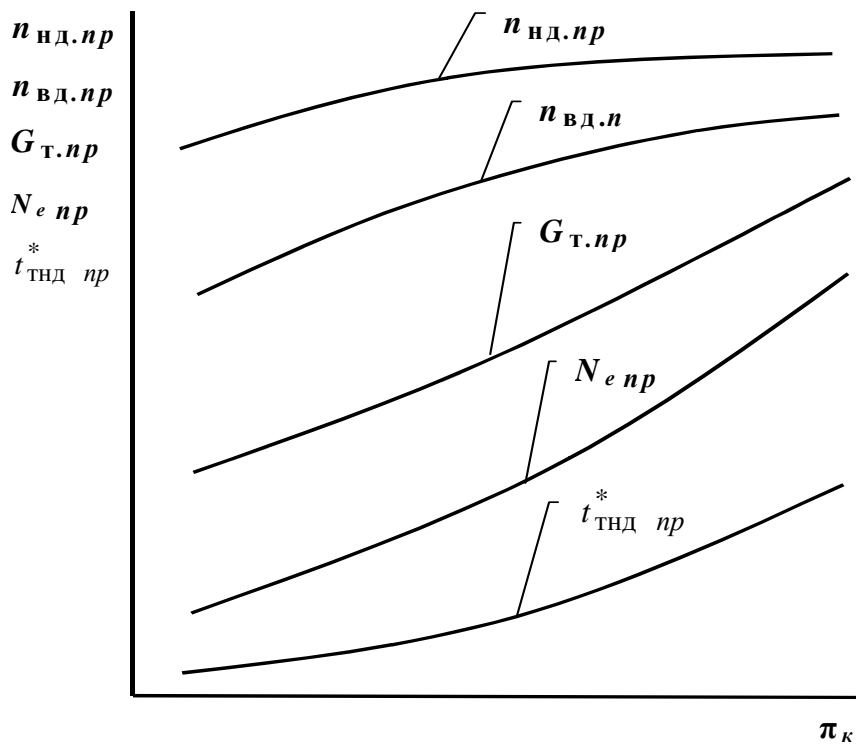


Рис.4.2 – Дросельна характеристика ГТУ

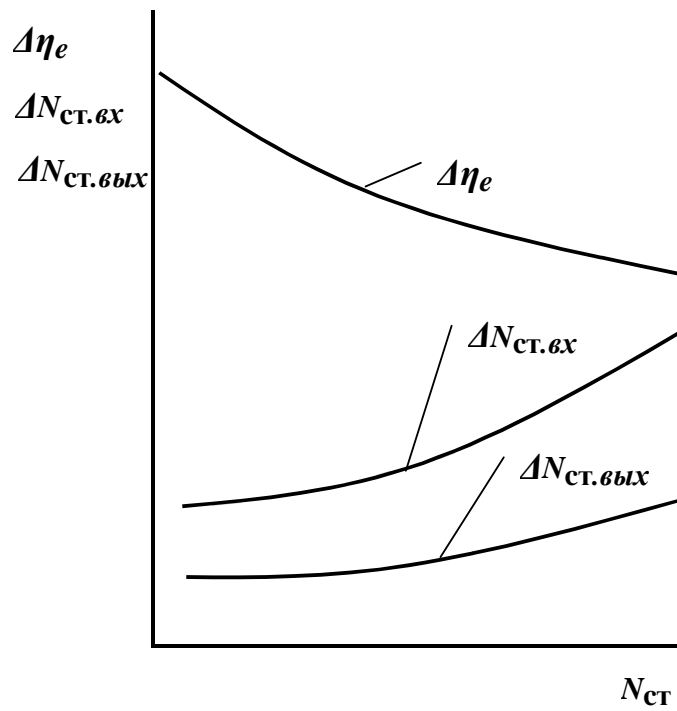


Рис.4.3 – Втрати потужності та ККД у вхідному та вихідному пристроях ГТУ

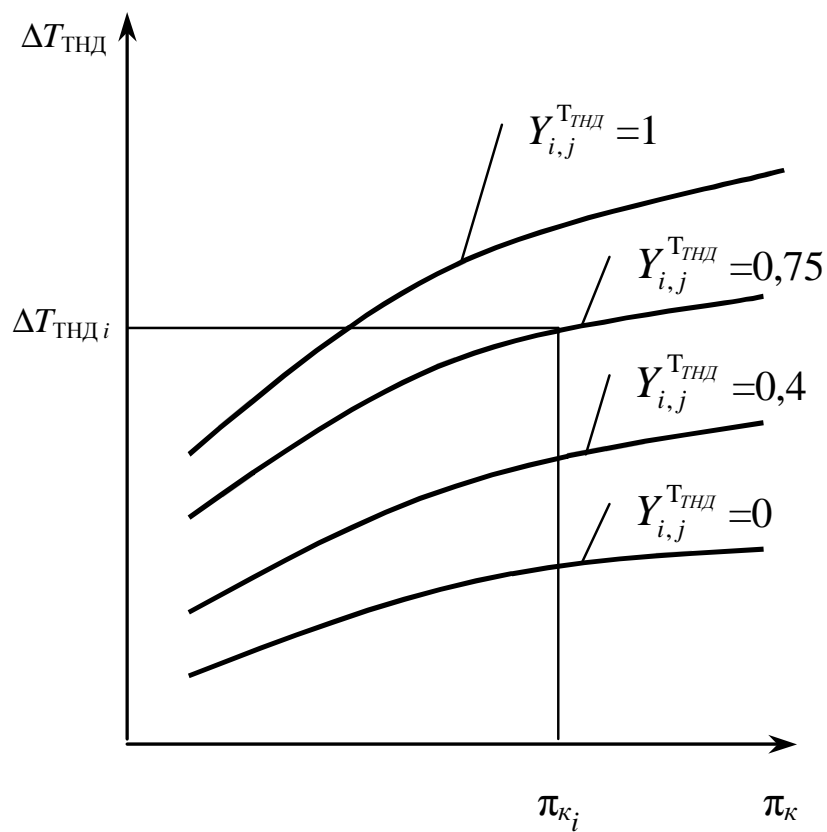


Рис.4.4 – Залежність температури продуктів згоряння за ТНТ від базового параметра і величини узагальненого дефекту

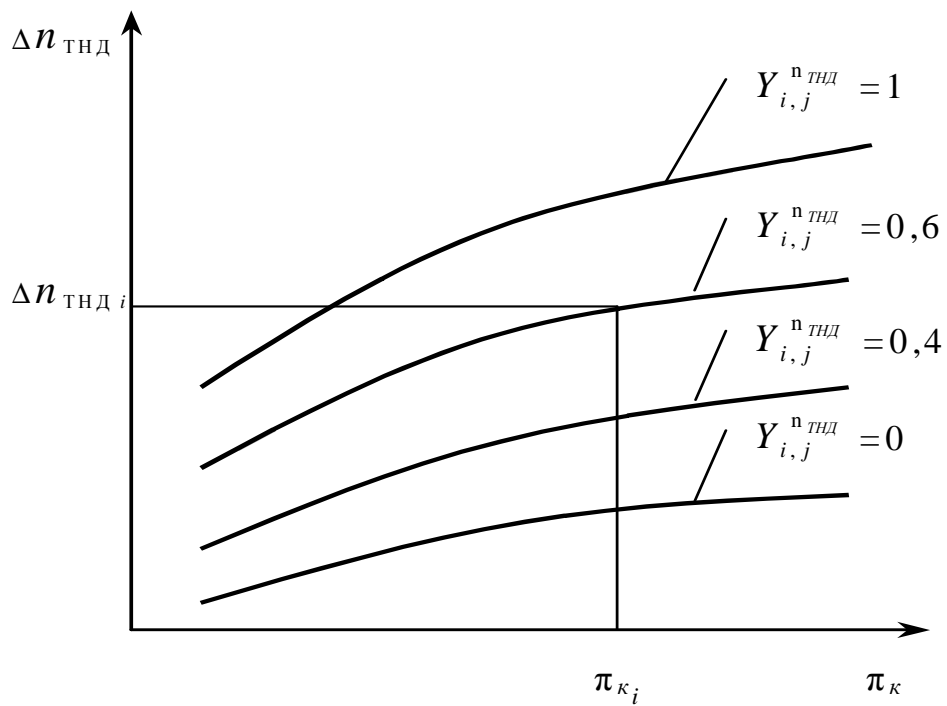


Рис.4.5 – Залежність частоти обертання ротора ТНТ від базового параметра і величини узагальненого дефекту

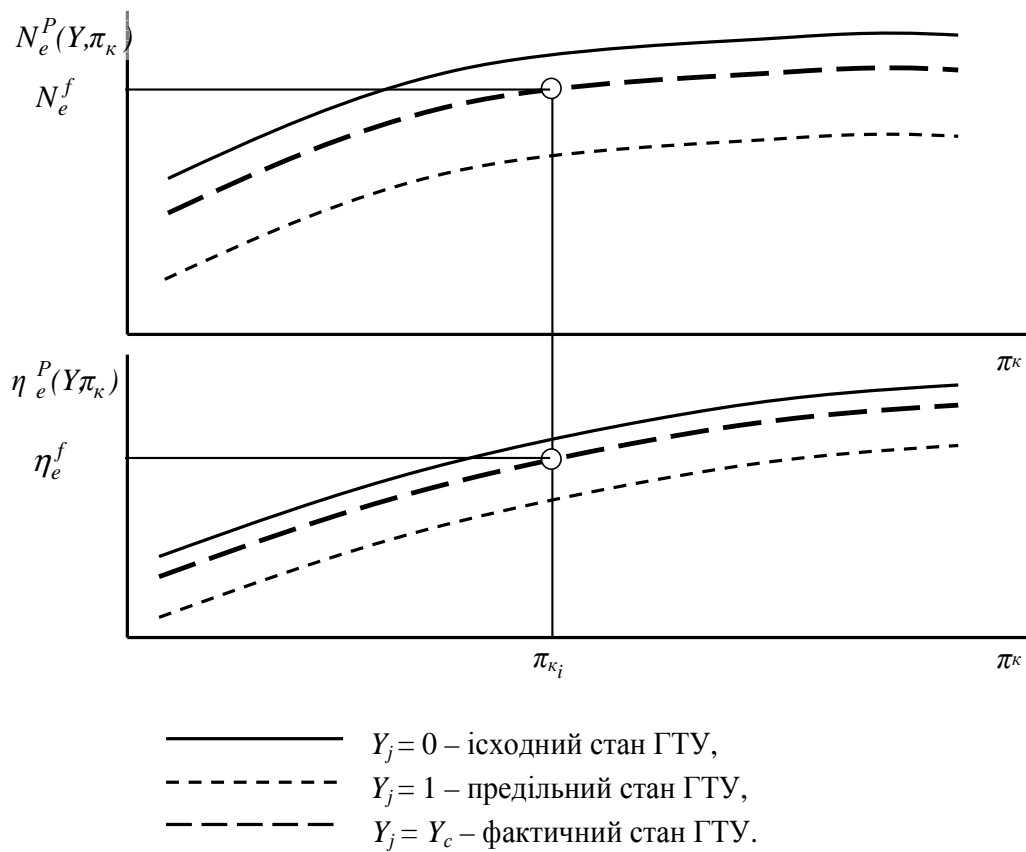


Рис.4.6 - Розрахунково- зведені характеристики ГТУ

Оцінку ФТС ГТУ визначають на основі перерахованої вихідної й оперативної інформації, що включає періодичну інформацію про контрольовані параметри ГТУ (тиск і температуру навколишнього середовища, температуру і тиск повітря на вході в ГТУ, тиск повітря на виході компресора або компресора високого тиску (КВТ) для двохвальних ГТУ, температуру продуктів згоряння на вході силової турбіни (СТ), температуру і тиск продуктів згоряння за СТ, втрату тиску у вхідному і вихідному пристроях ГТУ (при наявності вимірів перепаду тисків), частоти обертання роторів високого тиску (ВТ), низького тиску (НТ) і СТ, склад паливного газу). Склад оперативної інформації залежить від типу ГТУ.

Розроблений метод спирається на визначення кінцевої безлічі узагальнених дефектів проточної частини  $\{Y_j\} \quad j = \overline{1, NS}$  і визначення для кожного елемента цієї безлічі (виду узагальненого дефекту) розраховочних зведених характеристик: потужності і ККД ГТУ, частот обертання ТВТ, ТНТ і СТ, температури продуктів згоряння на вході в СТ, у функції від величини цього виду дефекту і базового параметра.

Метод забезпечує можливість розрахунку фактичних значень витрати паливного газу, потужності і ККД ГТУ на основі обчислених фактичних зведених характеристик поточного вектора виміру параметрів ГТУ.

Загальна блок-схема оцінки ФТС ГТУ наведена на рис.4.7.

Зведення контрольованих параметрів до станційних умов проводять за формулами (1.31 ÷ 1.38).

ФТС ГТУ відповідно до розробленого методу визначається в два етапи.

На першому етапі визначають безліч значень узагальненого нормованого дефекту  $Y_{i,j}(X_i)$  за серією вимірів  $\{X_i\} \quad i = \overline{1, NI}$ , для кожного виду узагальненого дефекту  $\{Y_j\} \quad j = \overline{1, NS}$ .

Процедура визначення  $Y_{i,j}(X_i)$  полягає у виконанні наступних операцій.

На основі характеристик, що відбивають залежність змін контрольованих параметрів від виду і величини узагальненого дефекту, базового параметра, за

розрахованим значенням базового параметра і параметром ГТУ, що контролюється, знаходяться проекції узагальненого дефекту

$$\begin{aligned} Y_{i,j}^{n_{\text{HD}}} &= f(\Delta n_{\text{HD } np \ i}, \pi_i), \\ Y_{i,j}^{n_{\text{ВД}}} &= f(\Delta n_{\text{ВД } np \ i}, \pi_i), \\ Y_{i,j}^{n_{\text{СТ}}} &= f(\Delta n_{\text{СТ } np \ i}, \pi_i), \\ Y_{i,j}^{T_{\text{ТНД}}} &= f(\Delta T_{\text{ТНД } np \ i}^*, \pi_i), \end{aligned} \quad (4.1)$$

де  $\Delta n_{\text{HD } np \ i} = n_{\text{HD } np \ i} - n_{\text{HD } np \ i}^{\Pi}(\pi_i)$ ,

$\Delta n_{\text{ВД } np \ i} = n_{\text{ВД } np \ i} - n_{\text{ВД } np \ i}^{\Pi}(\pi_i)$ ,

$\Delta n_{\text{СТ } np \ i} = n_{\text{СТ } np \ i} - n_{\text{СТ } np \ i}^{\Pi}(\pi_i)$ ,

$\Delta T_{\text{ТНД } np \ i} = T_{\text{ТНД } np \ i} - T_{\text{ТНД } np \ i}^{\Pi}(\pi_i)$ .

Величину узагальненого нормованого дефекту  $Y_{ij}$  визначають за розрахованими значеннями проекцій дефектів по кожному параметру, що контролюється

$$Y_{i,j} = \frac{\sum_{l=1}^m a_l Y_{i,j}^l}{m}, \quad (4.2)$$

де  $m$  – число контрольованих параметрів, за зміною яких визначають узагальнений дефект,

$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  – матриця-рядок вагових коефіцієнтів, що враховують похибку каналів виміру параметрів ГТУ.

У результаті обробки серії вимірів формують масив значень узагальнених дефектів  $\{Y_{i,j}(X_i)\}$   $i = \overline{1, NI}$ ,  $j = \overline{1, NS}$ .

На другому етапі визначення оцінки ФТС ГТУ здійснюють критеріальний вибір узагальненого дефекту  $Y_c$  з безлічі  $\{Y_j\}$   $j = \overline{1, NS}$ , що забезпечує максимум вірогідності оцінки ФТС на основі обчислених масивів значень узагальнених дефектів за декількома послідовними серіями вимірів  $\{Y_{i,j}(X_i)\}$   $j = \overline{1, NS}$ ,  $i = \overline{1, NI}$ .

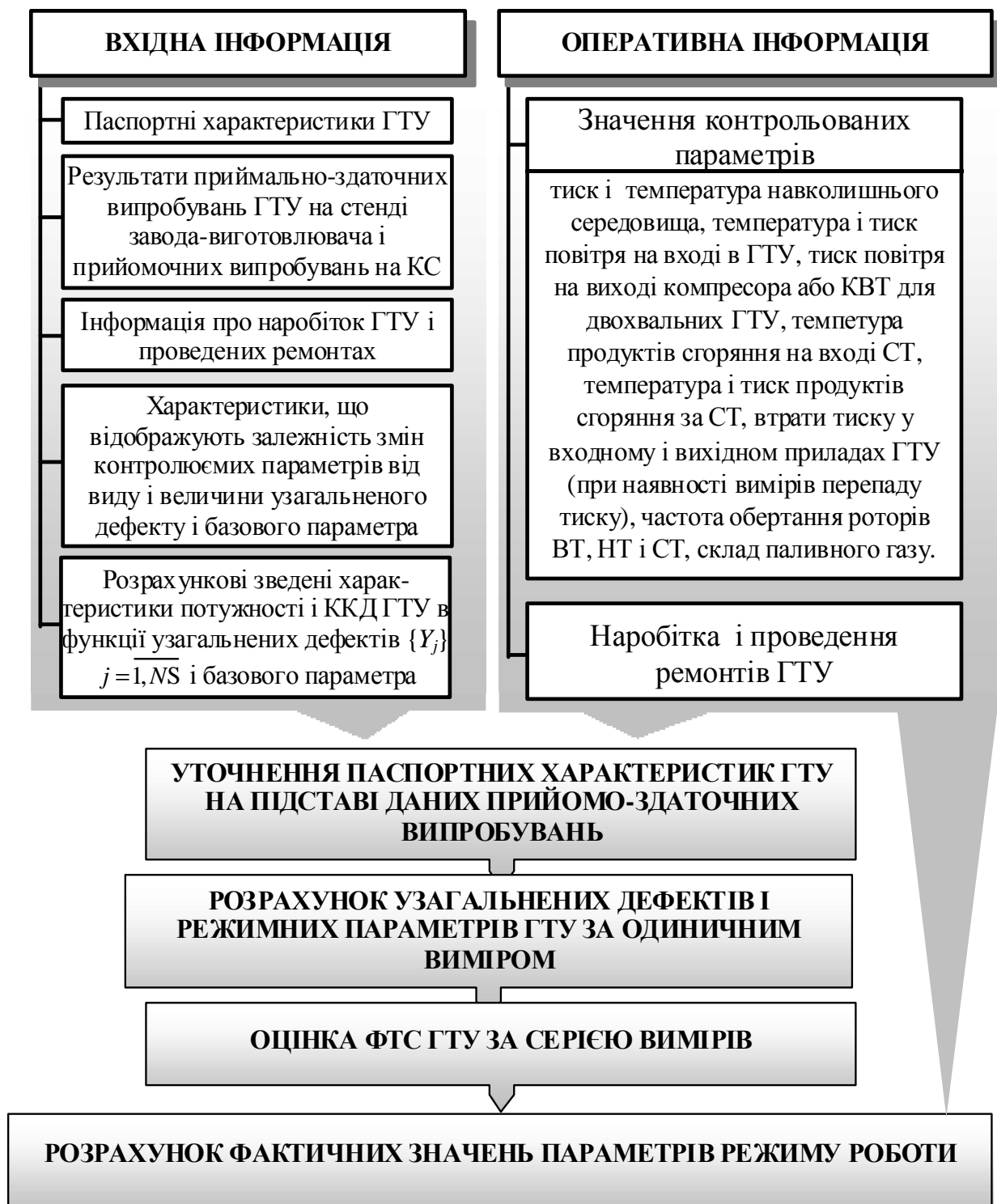


Рис.4.7 – Загальна блок-схема оцінки функціонально-технічного стану ГТУ

Як міру об'єктивної відповідності, що характеризує вірогідність, обрана середньоквадратична функція відхилення обчисленого значення узагальненого дефекту  $Y_{i,j}(X_i)$  від його розраховочного значення  $Y_{i,j}^r$ . Розраховочне значення

узагальненого дефекту  $Y_{i,j}^r$  визначається на основі статистичного аналізу результатів обчислення значень  $j$ -го виду дефекту на всьому межремонтному часовому інтервалі вимірів параметрів ГТУ. Формульні залежності для визначення  $Y_{i,j}^r$ , середньої по серії швидкості зміни узагальненого нормованого дефекту  $VY_c$  аналогічні наведеним в розділі 3 для ВЦН.

Максимум вірогідності оцінки ФТС досягається при мінімізації середньоквадратичних відхилень обчисленого значення узагальненого дефекту  $Y_{i,j}(X_i)$  від його розраховочного значення  $Y_{i,j}^r$ , найдених за всіма вимірами серії. При цьому вид узагальненого дефекту  $Y_c$  обирається за умов

$$\sum_{i=1}^N (Y_{i,c}(X_i) - Y_{i,c}^r)^2 < \sum_{i=1}^N (Y_{i,j}(X_i) - Y_{i,j}^r)^2, \quad (4.3)$$

для  $j = 1, \dots, c-1, c+1, \dots, NS$  при виконанні умов

$$VY_{\min} < VY_c < VY_{\max} \quad \text{и} \quad Y_{\min} < Y_c(T_{\text{сер}}) < Y_{\max},$$

де  $N$  – кількість періодичних вимірів параметрів ГТУ в серії,

$VY_c$  – середня за серією вимірів швидкість зміни узагальненого дефекту,

$Y_c(T_{\text{сер}})$  – математичне очікування узагальненого дефекту  $Y_c$  для серії вимірів,

$VY_{\min}$ ,  $VY_{\max}$ ,  $Y_{\min}$ ,  $Y_{\max}$  – межі, що відокреслюють для справного ГТУ зміни швидкості і величини узагальненого дефекту.

Кінцевою операцією статистичного аналізу оцінки ФТС є вибір з безлічі розглянутих узагальнених дефектів  $\{Y_j\}$ ,  $j = \overline{1, NS}$  одного  $Y_c$  виходячі з критерія максимуму вірогідності (аналогічного приведену в розділі 3), при наявності обмеження на швидкість і на величину зміни дефекту. Цей вибір здійснюється по завершенні кожної серії вимірів із заданим закругленням.

У результаті отриманого значення  $Y_c$  визначають фактичну дросельну і універсальну характеристики, як це вказано на рис.4.8 и 4.9.

КТС ГТУ визначають для номінального режиму роботи на основі її фактичних характеристик в обсязі, що включає:

– КТС за зведеною ефективною потужністю  $N_{e \text{ пр}}$

$$K_N^{\text{ГТУ}} = \frac{N_{e \text{ пр}}}{N_{e \text{ пр}}^{\text{П}}}; \quad (4.5)$$



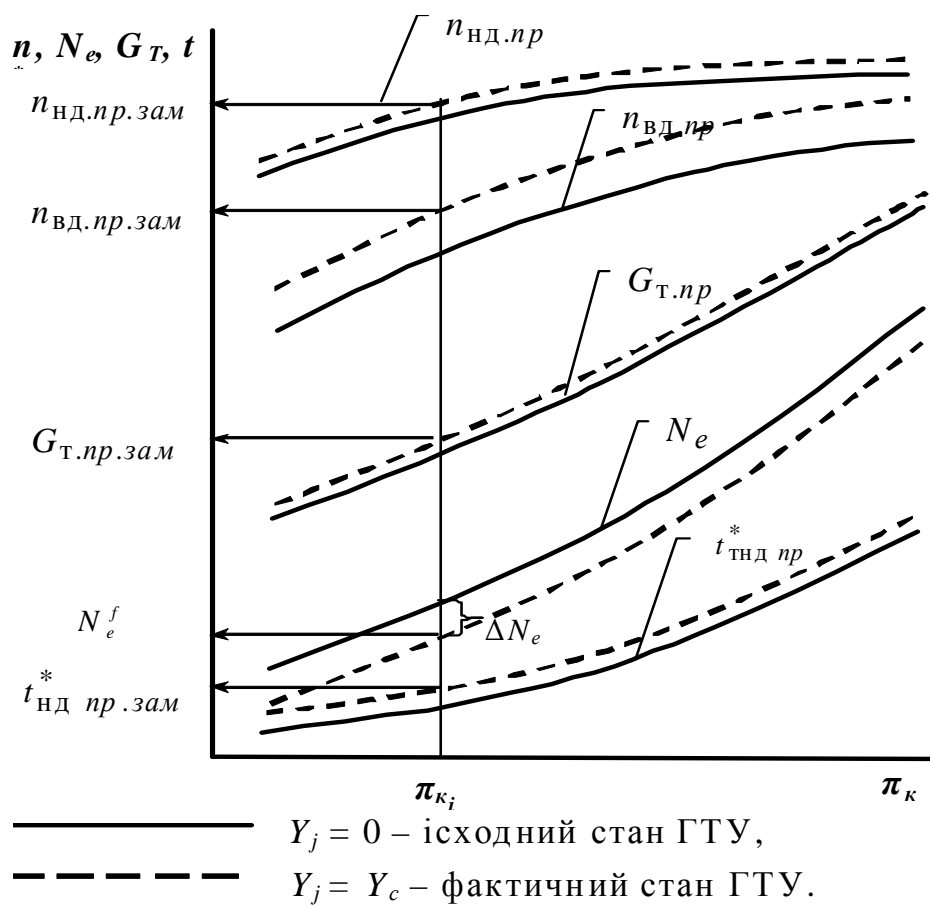


Рис.4.8 – Фактична дросельна характеристика ГТУ

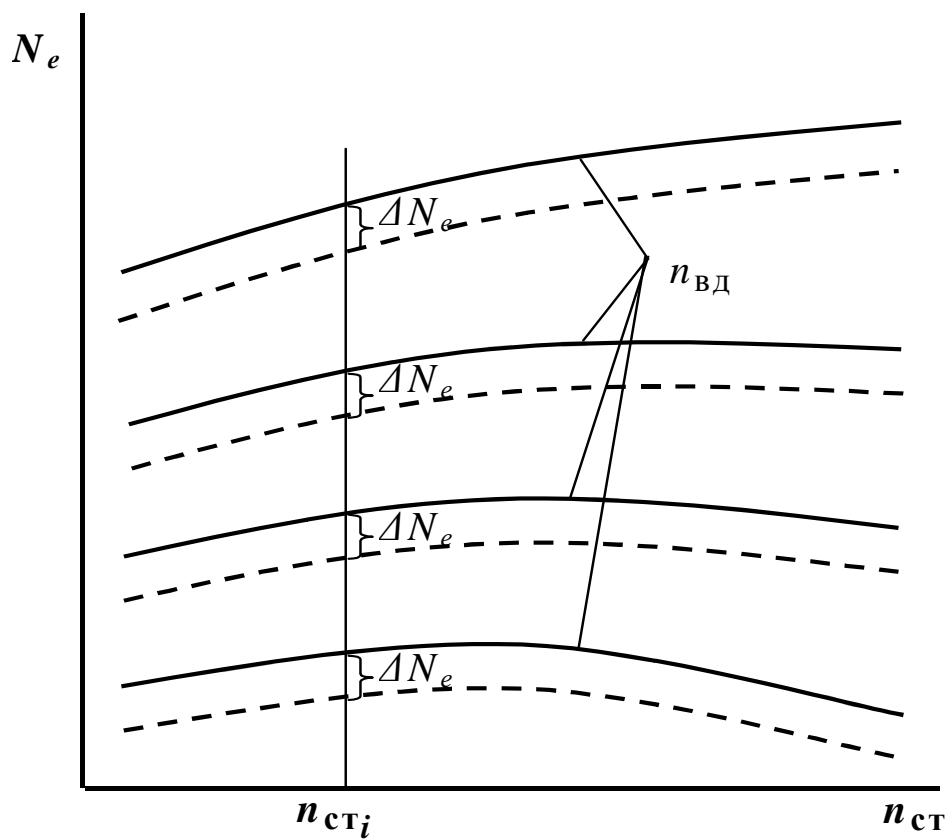


Рис.4.9 – Фактична універсальна характеристика ГТУ

- КТС за витратами паливного газу  $G_{\text{тг}}$

$$K_{\text{тг}}^{\text{ГТУ}} = \frac{\left(G_{\text{тг}} \cdot Q_p^H\right)_{\text{нр}}^{\text{П}}}{\left(G_{\text{тг}} \cdot Q_p^H\right)_{\text{нр}}}; \quad (4.6)$$

- КТС за ефективним ККД  $\eta_e$

$$K_{\eta}^{\text{ГТУ}} = \frac{\eta_e(N_e, G_{\text{тг}})}{\eta_e^{\text{П}}(T_1, T_3, P_3)}. \quad (4.7)$$

Крім того, визначають середньозважені КТС для трьох значень базового параметра  $n_{\text{тнд } t}, 1, t = 1, 2, 3$ .

- середньозважений КТС ГТУ за потужністю

$$K_{N \text{ cp}}^{\text{ГТУ}} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{t=1}^3 K_N^{\text{ГТУ}}(n_{\text{тнд } t}); \quad (4.8)$$

- середньозважений КТС ГТУ за витратами паливного газу

$$K_{\text{тг } \text{cp}}^{\text{ГТУ}} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{t=1}^3 K_{\text{тг}}^{\text{ГТУ}}(n_{\text{тнд } t}). \quad (4.9)$$

- середньозважений КТС ГТУ за ефективним ККД ( $K_{\eta \text{ cp}}^{\text{ГТУ}}$ )

$$K_{\eta \text{ cp}}^{\text{ГТУ}} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{t=1}^3 K_{\eta}^{\text{ГТУ}}(n_{\text{тнд } t}). \quad (4.10)$$

Зміну технічного стану ГТУ за визначений інтервал часу оцінюють за результатами порівняння отриманих значень КТС із КТС, що розраховані на початок цього інтервалу часу.

Фактичні значення зведеної потужності і ККД ГТУ визначають на основі розрахункових зведених характеристик і обчисленого значення обраного узагальненого дефекту  $Y_c$ . Формули для розрахунку цих параметрів представлені у вигляді

$$N_{e \text{ нр}}^f(\pi_{\kappa}) = N_{e \text{ нр}}^p(\pi_{\kappa}, Y_c), \quad \eta_e^f(\pi_{\kappa}) = \eta_e^p(\pi_{\kappa}, Y_c). \quad (4.11)$$

Фактичні витрати паливного газу ГТУ визначають за наступною формулою

$$G_{\text{т}}^f = \frac{N_e^f}{\eta_e^f Q_p^H}. \quad (4.12)$$

## 4.2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВІРОГІДНОСТІ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОТУРБІННОЇ УСТАНОВКИ

Для оцінки похибки визначення ФТС ГТУ потужністю 10 *MВт* за результатами приймально-здавальних випробовувань були розглянуті відхилення основних параметрів ГТУ, які були обчислені за допомогою розробленого методу визначення ФТС ГТУ, відносно параметрів, що розраховані за допомогою характеристик, що отримані при приймально-здавальних випробуваннях ГТУ на стенді заводу-виготовлювача.

Значення параметрів, що отримані на стенді заводу-виготовлювача, використовувалися як контрольовані параметри. При цьому втрати тиску у вхідному і вихідному пристроях ГТУ на всіх режимах приймалися однаковими, (що дорівнюються 8,14 *кПа* (61 *мм.рт.ст.*) і 46,7 *кПа* (350 *мм.рт.ст.*) відповідно). Як базовий параметра приймали міру стиснення повітря в компресорах ГТУ.

За допомогою повузлової моделі ГТУ, що описана нижче, моделювалися різні дефекти проточної частини і їхні можливі комбінації в різних вузлах ГТУ. Усього було промодельовано більш ста варіантів. У результаті моделювання були отримані розрахункові характеристики зміни контрольованих параметрів у залежності від видів дефектів і їхньої величини. Відповідно до заданих констант ранжирування обрані двадцять сім видів узагальнених дефектів. Фактичні характеристики і режимні параметри ГТУ визначалися відповідно до запропонованого методу. При цьому вид узагальненого дефекту обирався відповідно до умови (4.3) за однією серією вимірів, що включає виміри по чотирьох режимах роботи ГТУ.

Як показав аналіз результатів розрахунків, кількість вимірів по одній серії виявилась достатньою для визначення необхідних оцінок, унаслідок високої точності виміру контрольованих параметрів.

Результати оцінки вірогідності визначення ФТС ГТУ наведені в табл.4.1 ÷ 4.3. і на рис.4.10, 4.11.

На рис.4.10 наведені паспортна і фактична дросельні характеристики ГТУ, що отримані на стенді заводу-виготовлювача.

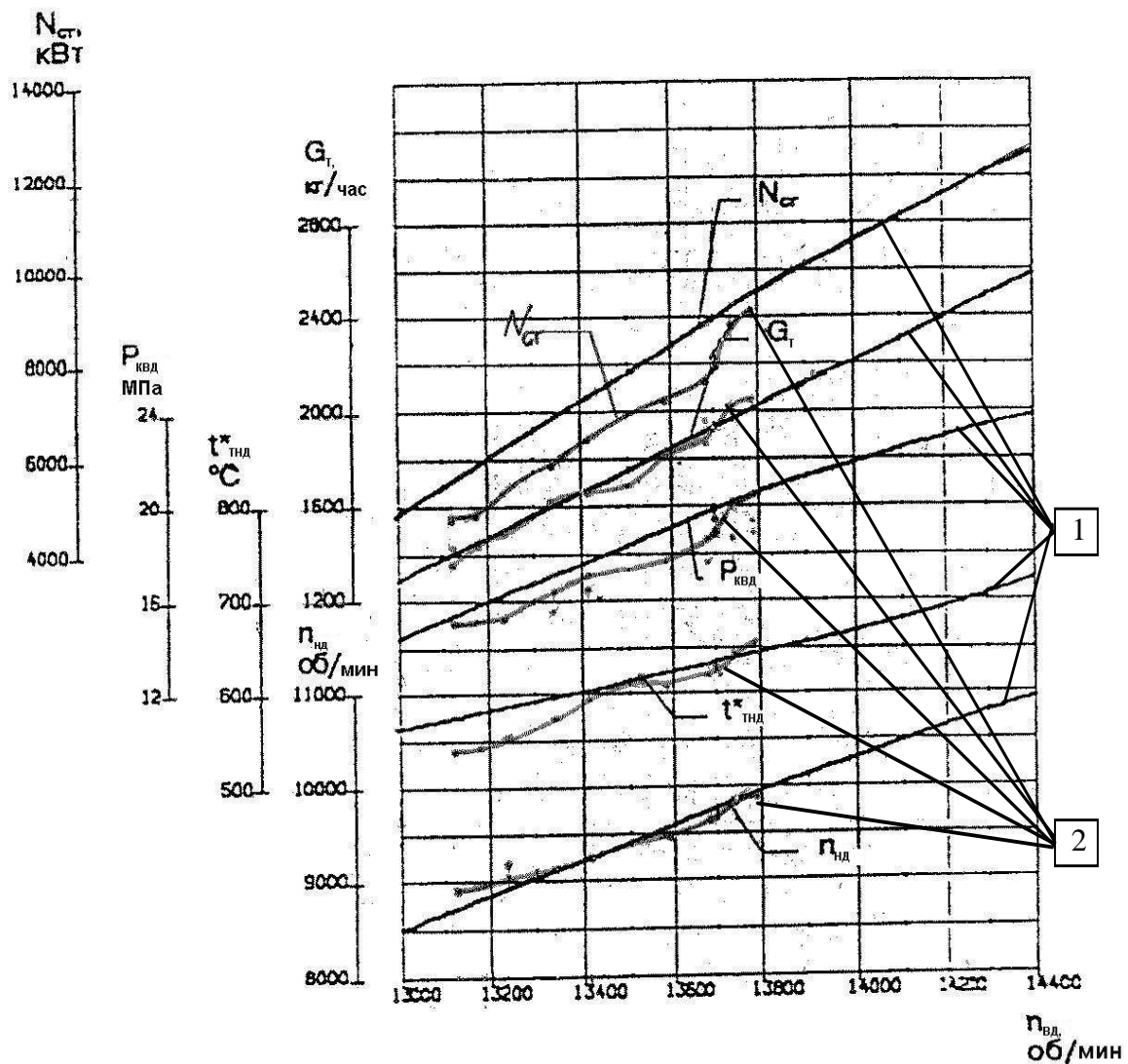


Рис.4.10 – Дросельні характеристики ГТУ потужністю 10 MBt: 1 – паспортна дросельна характеристика ГТУ, 2 – фактична дросельна характеристика ГТУ, що розрахована за результатами приймально-здавальних випробувань

У табл.4.1 наведені значення контрольованих параметрів, що отримані на стенді для різних режимів роботи ГТУ.

У табл.4.2 наведені результати порівняння відхилення контрольованих параметрів (частот обертання роторів ТВТ, ТНТ і СТ, температури газу за ТНТ), обмірюваних на стенді й отриманих за паспортною дросельною характеристикою ГТУ при заданій мірі стиснення. Неузгодженість між їхніми значеннями дозволяє зробити висновок про те, що фактичні характеристики ГТУ істотно (до 5 %) відрізняються від паспортних.

У таблиці 4.3 наведені порівняльні дані щодо потужності, витрати паливного газу і ККД ГТУ, що отримані на стенді заводу-виготовлювача і розраховані за запропонованим методом визначення ФТС ГТУ.

Таблиця 4.1 – Значення контрольованих параметрів на різних режимах роботи ГТУ

№ п/п	Контрольовані параметри	Режим № 1 N=5000 кВт	Режим № 2 N=6000 кВт	Режим № 3 N=8000 кВт	Режим № 4 N=9000 кВт
1	2	3	4	5	6
1	Температура повітря на вході в ГТУ, $K$	276,2	276,1	275,6	276,3
2	Вимірний тиск повітря на вході в ГТУ, $kg/cm^2$	1,02504	1,02504	1,02504	1,02504
3	Вимірний тиск повітря за КВД ГТУ, $kg/cm^2$	15,28	16,48	19,21	20,39
4	Вимірня частота обертання ротора СТ ГТУ, $об/хв.$	6501	6506	6585	6501
5	Зведена частота обертання ротора СТ ГТУ, $об/хв.$	6638	6645	6732	6637
6	Вимірня частота обертання ротора ТВТ ГТУ, $об/хв.$	12919	13063	13406	13514
7	Зведена частота обертання ротора ТВТ ГТУ, $об/хв.$	13192	13342	13704	13797
8	Вимірня частота обертання ротора ТНТ ГТУ, $об/хв.$	8769	9046	9472	9650
9	Зведена частота обертання ротора ТНТ ГТУ, $об/хв.$	8954	9239	9683	9852
10	Вимірня температура газу за ТНТ ГТУ, $^{\circ}C$	514	539	597	615
11	Зведена температура газу за ТНТ ГТУ, $^{\circ}C$	548	574	636	653
12	Вимірні витрати паливного газу ГТУ, $kg/god$	1404	1563	1928	1977
13	Зведені витрати паливного газу ГТУ, $kg/god$	1445	1609	1987	2034

Таблиця 4.2 – Відхилення вимірних контрольованих параметрів від параметрів, що отримані за дросельною характеристикою на різних режимах роботи ГТУ

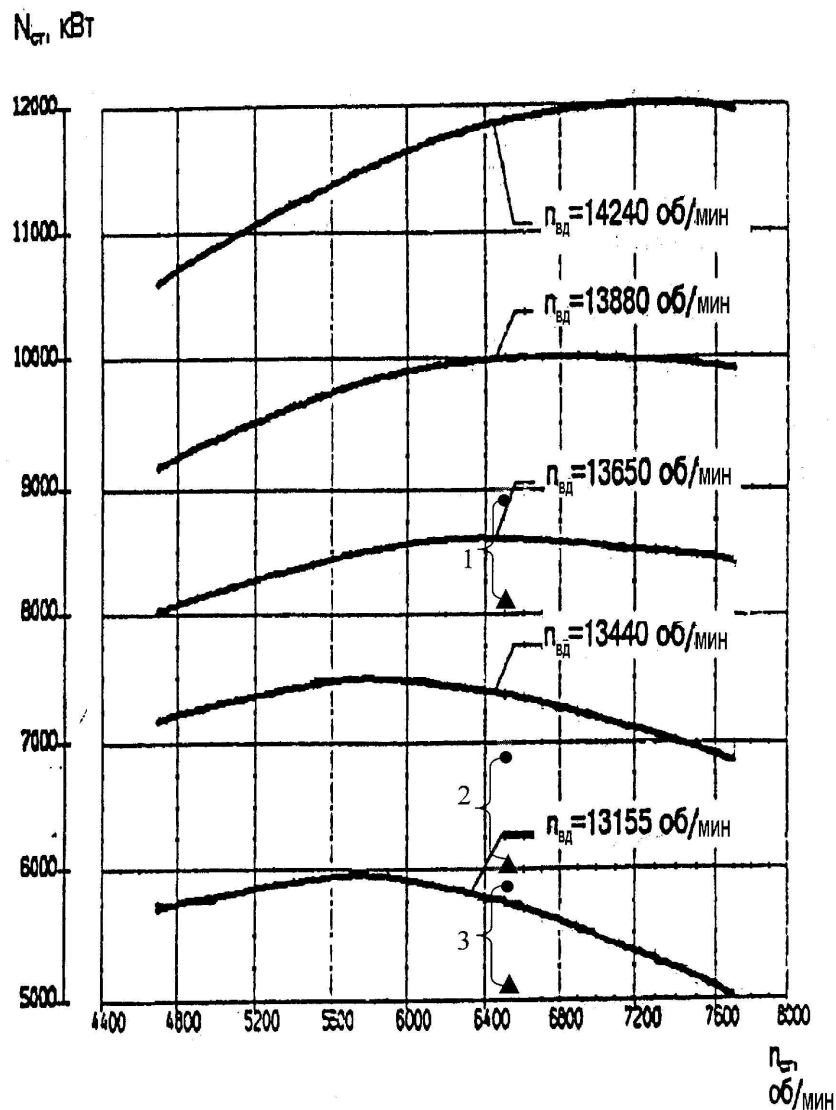
№ п/п	Параметри	Режим № 1 N=5000 кВт	Режим № 2 N=6000 кВт	Режим № 3 N=8000 кВт	Режим № 4 N=9000 кВт
1	Зведена частота обертання ротора ТВТ ГТУ, <i>об/хв.</i>	13192	13342	13704	13797
2	Зведена частота обертання ротора ТВТ згідно з дросельною характеристикою ГТУ, <i>об/хв.</i>	13080	13250	13580	13760
3	Відхилення частоти обертання ротора ТВТ (виміряне і отримане згідно з дросельною характеристикою), %	– 0,85	– 0,69	– 0,91	– 0,27
4	Зведена частота обертання ротора ТНТ ГТУ, <i>об/хв.</i>	8954	9239	9683	9852
5	Зведена частота обертання ротора ТНТ ГТУ згідно з дросельною характеристикою, <i>об/хв.</i>	8680	8920	9590	9900
6	Відхилення частоти обертання ротора ТНТ (виміряне і отримане згідно з дросельною характеристикою), %	– 3,06	– 3,45	– 0,96	0,49
7	Зведена температура газу за ТНТ ГТУ, °C	548	574	636	653
8	Зведена температура газу за ТНТ згідно з дросельною характеристикою ГТУ, °C	575	590	625	645
9	Відхилення температури газу за ТНТ ГТУ (виміряне і отримане згідно з дросельною характеристикою), %	4,9	2,8	– 1,7	– 1,2

Таблиця 4.3 - Порівняння значень потужності, витрати паливного газу обмірюваних на стенді й отриманих розрахунковим шляхом

Виконаний розрахунок		Режим № 1 $N = 5000$ кВт	Режим № 2 $N = 6000$ кВт	Режим № 3 $N = 8000$ кВт	Режим № 4 $N = 9000$ кВт
Зведена витрата паливного газу ГТУ	Фактичний, $кг/год$	1445	1609	1987	2034
	Розрахунковий $кг/год$	1398	1562,7	1940,7	2072,3
	Похибка розрахунку %	– 3,3	– 2,88	– 2,33	1,88
Зведена потужність на валу СТ ГТУ	Фактична, $кВт$	5001	5997	8061	9055
	Розрахункова $кВт$	5123,7	5974,47	7842,95	9116,3
	Погрешность расчета, %	2,5	– 0,38	– 2,7	0,68
ККД ГТУ	Фактичний, %	24,9	26,82	29,2	32,03
	Розрахунковий, %	26,4	27,5	29,1	31,6
	Похибка розрахунку, %	6	2,5	– 0,34	– 1,3

На рис.4.11 наведена паспортна універсальна характеристикна з нанесенням на неї значень режимних параметрів, які обчислені за паспортною характеристикою й обмірюваних на стенді.

Як видно з табл.4.2 і рис.4.10, максимальне відхилення частоти обертання ротора ТВТ, частоти обертання ТНТ, температури продуктів згоряння за ТНТ, обчислених за дросельною характеристикою, щодо обмірюваних не перевищують відповідно 1 %, 4 % і 5 %. На режимах, близьких до номінального, дані похибки зменшуються в 1.5 - 2 рази.



1 –  $n_{ВД} = 13704 \text{ об/мин}$ , 2 –  $n_{ВД} = 13342 \text{ об/мин}$ , 3 –  $n_{ВД} = 13192 \text{ об/мин}$ ,

- – паспортное значение,
- ▲ – фактическое значение.

Рис. 4.11 – Універсальна характеристика ГТУ потужністю 10 МВт



Максимальна похибка визначення витрат паливного газу, розрахованих за фактичною дросельною характеристикою від обмірюваного не перевищила 4 %, а визначення потужності ГТУ не перевищила 3 %.

У той же час граничне відхилення значень потужності, розрахованих за фактичною універсальною характеристикою щодо обмірюваних на стенді (рис.4.11) досягає 14 %. Відносно велика величина похибки розрахунку потужності обумовлена істотним відхиленням фактичної універсальної характеристики за потужністю від паспортної. Таким чином, для підвищення вірогідності оцінки ФТС ГТУ в реальній експлуатації доцільно виконувати уточнення паспортних характеристик ГТУ за даними приймально-здавальних випробувань.

Розглянемо повузлову модель ГТУ, за допомогою якої здійснюється моделювання впливу дефектів проточної частини ГТУ на її характеристики й оцінюється похибка методу оцінки ФТС ГТУ на основі визначення узагальненого нормованого дефекту. Представлено результати визначення погрішності оцінки ФТС і основних режимних параметрів ГТУ, отриманих за допомогою повузлової моделі ГТУ.

Застосування даної математичної моделі визначається необхідністю вирішення двох груп задач. Це:

- вибір необхідної безлічі узагальнених дефектів проточної частини ГТУ і визначення для кожного з них розрахункових дросельної і універсальної характеристик;
- аналіз похибки визначення оцінок ФТС ГТУ за допомогою розробленого методу при моделюванні різних видів дефектів проточної частини.

Модель передбачає можливість врахування таких наступних факторів, як:

- зміна теплофізичних властивостей робочого тіла в залежності від його складу і температури;
- вплив вологості повітря на вході в ГТУ;
- використання заданих характеристик і конструктивних даних усіх вузлів ГТУ;

- зміна коефіцієнтів втрат у вузлах ГТУ залежно від режиму роботи;
- зміна характеристик вузлів ГТУ при зміні зовнішніх умов і різних дефектів проточної частини;
- витрати потужності на привод агрегатів і на механічні втрати по кожному з валів;
- добори повітря за різними ступіннями компресорів;
- підведення повітря для охолодження гарячих частин ГТУ;
- многорежимність (можливість розрахунку реальних режимів роботи ГТУ);
- універсальність застосування (можливість моделювання більшості застосовуваних схем ГТУ).

Універсальна повузлова модель складається з групи загальних для всіх типів ГТУ моделей вузлів, а також наборів індивідуальних характеристик і конструктивних даних вузлів установок.

Для моделювання різних типів ГТУ на базі даної універсальної моделі використовується узагальнена схема проточної частини. Її використання дозволяє отримати ряд значних переваг:

- єдине для всіх типів ГТУ параметричне подання характеристик вузлів;
- простоту переходу від однієї схеми установки до іншої в процесі визначення розрахункових дросельних і універсальних характеристик ГТУ й аналізу похибок оцінки ФТС ГТУ.

За допомогою універсальної поузлової моделі параметри робочого тіла (температура, тиск, витрати) можуть бути розраховані в кожному з перерізів проточної частини. Обчислювальний процес в універсальній повузловій моделі зводиться до рішення системи з  $KN$  нелінійних алгебраїчних рівнянь, що описують умови сумісної роботи вузлів ГТУ

$$\vec{N}(\vec{X}, \vec{U}, \vec{\Theta}) = 0, \quad (4.13)$$

де  $\vec{N}$  – нев'язки (за потужністю, витратами газу, площами перерізів та інш.), що відображують погодженість роботи окремих вузлів. Число нев'язок  $KN$  залежить від схеми проточної частини;

$\vec{X}$  – вектор незалежних перемінних, що вибираються з умови однозначності визначення робочих точок на характеристиках усіх вузлів (число незалежних перемінних дорівнює числу нев'язок);

$\vec{U}$  – вектор зовнішніх умов і режимних параметрів;

$\vec{\Theta}$  – вектор параметрів стану (параметрів характеристик вузлів).

Як нев'язки використовують рівняння, що відбивають наступні умови:

- балансу витрат повітря, визначених з характеристик КНТ і КВД з урахуванням витрати повітря, що відбирається

$$G_{\text{КНД}}(\pi_{\text{ККНД}}, n_{\text{КНД}}) - G_{\text{КВД}}(\pi_{\text{ККВД}}, n_{\text{КВД}}) - \Delta G_{\text{Отб}} = 0, \quad (4.14)$$

де  $G_{\text{КНД}}(\pi_{\text{ККНД}}, n_{\text{КНД}})$ ,  $G_{\text{КВД}}(\pi_{\text{ККВД}}, n_{\text{КВД}})$  – витрати повітря відповідно КНТ і КВД при мірах стиснення і частотах обертання компресорів  $\pi_{\text{ККНД}}, \pi_{\text{ККВД}}$  і  $n_{\text{КНД}}, n_{\text{КВД}}$ ;

$\Delta G_{\text{Отб}}$  – витрата відбираного повітря;

- баланс між наявними і потрібними значеннями зведених витрат продуктів згоряння через турбіни

$$G_{\text{ТВД}}(\pi_{m_{\text{ТВД}}}, n_{\text{КВД}}) - G_{\text{ТВД}} = 0, \quad (4.15)$$

$$G_{\text{ТНД}}(\pi_{m_{\text{ТНД}}}, n_{\text{КНД}}) - G_{\text{ТНД}} = 0, \quad (4.16)$$

$$G_{\text{СТ}}(\pi_{m_{\text{СТ}}}, n_{\text{СТ}}) - G_{\text{СТ}} = 0, \quad (4.17)$$

де  $G_{\text{ТВД}}(\pi_{m_{\text{ТВД}}}, n_{\text{КВД}})$ ,  $G_{\text{ТНД}}(\pi_{m_{\text{ТНД}}}, n_{\text{КНД}})$ ,  $G_{\text{СТ}}(\pi_{m_{\text{СТ}}}, n_{\text{СТ}})$  – значення зведених витрат продуктів згоряння відповідно турбін високого тиску, низького тиску і силової турбіни;

$G_{\text{ТВД}}, G_{\text{ТНД}}, G_{\text{СТ}}$  – потрібні значення зведених витрат продуктів згоряння відповідно турбін високого тиску, низького тиску і силової турбіни;

- балансу між витратами повітря і газу на вході камери згоряння і продуктів згоряння на її виході

$$G_{\text{квд}}(\pi_{\kappa_{\text{квд}}}, n_{\text{квд}}) + G_{\text{дозат}}(P_{\text{зад}}, P_{\text{рас}}) - G_{\text{твд}}(\pi_{m_{\text{твд}}}, n_{\text{квд}}) = 0, \quad (4.18)$$

де  $G_{\text{дозат}}(P_{\text{зад}}, P_{\text{рас}})$  – витрати газу на виході дозатора у функції від відхилення розраховочного значення параметра  $P_{\text{рас}}$  від заданого  $P_{\text{зад}}$ , що визначає режим роботи ГТУ;

- відхилення між заданим і розрахунковим значеннями параметрів, що визначають режим роботи ГТУ

$$P_{\text{зад}} - P_{\text{рас}} = 0; \quad (4.19)$$

- баланс потужностей турбіни і компресора або ВЦН, що знаходяться на одному валу

$$N_{\text{квд}}(\pi_{\kappa_{\text{квд}}}, n_{\text{квд}}) - N_{\text{твд}}(\pi_{m_{\text{твд}}}, n_{\text{квд}}) \cdot \eta_{\text{мех}_{\text{квд}}} - \Delta N_{\text{твд}} = 0, \quad (4.20)$$

$$N_{\text{кнд}}(\pi_{\kappa_{\text{кнд}}}, n_{\text{кнд}}) - N_{\text{тнд}}(\pi_{m_{\text{тнд}}}, n_{\text{кнд}}) \cdot \eta_{\text{мех}_{\text{кнд}}} - \Delta N_{\text{тнд}} = 0, \quad (4.21)$$

$$N_{\text{цбн}} - N_{\text{ст}}(\pi_{m_{\text{ст}}}, n_{\text{ст}}) \cdot \eta_{\text{мех}_{\text{ст}}} - \Delta N_{\text{ст}} = 0, \quad (4.22)$$

де – значення потужності відповідно КВТ, КНТ и ВЦН;

$N_{\text{твд}}(\pi_{m_{\text{твд}}}, n_{\text{квд}})$ ,  $N_{\text{тнд}}(\pi_{m_{\text{тнд}}}, n_{\text{кнд}})$ ,  $N_{\text{ст}}(\pi_{m_{\text{ст}}}, n_{\text{ст}})$  – значення потужності відповідно ТВТ, ТНТ и СТ;

$\eta_{\text{мех}_{\text{квд}}}$ ,  $\eta_{\text{мех}_{\text{кнд}}}$ ,  $\eta_{\text{мех}_{\text{ст}}}$  – коефіцієнти механічних втрат відповідно КВТ, КНТ и ВЦН;

$\Delta N_{\text{твд}}$ ,  $\Delta N_{\text{тнд}}$ ,  $\Delta N_{\text{ст}}$  – значення потужностей, що відбираються від відповідних турбін.

Систему (4.13) вирішують методом Ньютона [26] за наступною ітераційною процедурою.

Задають нульове приближення незалежних перемінних  $\vec{X}^0$  і розраховують перемінні на вході і виході кожного вузла ГТУ. Далі обчислюються нев'язки, які у зв'язку з неточністю задання  $\vec{X}^0$  відмінні від нуля.

Незалежні перемінні на  $s$ -й ітерації обчислюють за формулою

$$\vec{X}^{s+1} = \vec{X}^s + \Delta\vec{X}^s. \quad (4.23)$$

Поправку  $\Delta\vec{X}^s$  до незалежних перемінних знаходять з системи лінійних рівнянь

$$\vec{N}^s = B^s \Delta\vec{X}^s, \quad (4.24)$$

де  $B^s$  – матриця Якобі на  $s$ -й ітерації.

У розробленій універсальній повузловій моделі ГТУ застосований прискорений алгоритм обчислення матриці Якобі, у якому розрахунок параметрів проточної частини при варіюванні незалежних перемінних виконують не з вхідного пристрою ГТУ, а з того вузла, в розрахунку якого використовується нев'язка. Умова завершення рахунку полягає в перевірці близькості нев'язок до нуля.

#### **Розрахунок параметрів робочого тіла в основних вузлах ГТУ**

Основними вузлами ГТУ в універсальній повузловій моделі є :

- компресори – КНТ, КВТ;
- турбіни – ТВТ, ТНТ і СТ;
- вхідний пристрій;
- камера згоряння;
- вихідний пристрій.

Під час розрахунку параметрів робочого тіла на входах/виходах цих вузлів використовують процедуру розрахунку теплофізичних властивостей робочого тіла.

Вхідними даними процедури є:

- $q$  – відносний зміст продуктів згоряння вуглецевого палива,
- $d$  – відносний вологовміст,
- $T$  – температура робочого тіла.

Розрахунок теплофізичних властивостей виконують відповідно до [10, 52]. У процедурі розраховують наступні вихідні дані: газову сталу робочого

тіла  $R_{\text{рТ}}$ , питому теплоємність  $C_{\text{р рТ}}$ , ентальпію  $i_{\text{рТ}}$  і ентропію  $s_{\text{рТ}}$  за наступними формулами

$$R = \frac{R_{\text{В}} + qR_{\text{Т}} + dR_{\text{ВОД}}}{1 + q + d}, \quad (4.25)$$

$$C_p = \sum_{j=1}^8 a_j \left( \frac{T}{1000} \right)^{j-1}, \quad (4.26)$$

$$i = \frac{qC}{1 + q} + T \sum_{j=1}^8 \frac{a_j}{j} \left( \frac{T}{1000} \right)^{j-1}, \quad (4.27)$$

$$S = a_1 \ln T + \frac{C_1 - qC_2}{1 + q} + \sum_{j=2}^8 \frac{a_j}{j-1} \left( \frac{T}{1000} \right)^{j-1}, \quad (4.28)$$

$$\text{де } a_j = \frac{a_{\text{В}j} + ga_{\text{Т}j} + da_{\text{ВОД}j}}{1 + q + d},$$

$C, C_1, C_2$  – константи,

$R_{\text{В}}, R_{\text{Т}}, R_{\text{ВОД}}$  – газова стала відповідно повітря, продуктів згоряння палива, парів води.

На підставі наведених формул за допомогою ітераційних процедур визначають наступні залежності:

$$T_{\text{рТ}}, s_{\text{рТ}}, C_{\text{р рТ}} \quad \text{від} \quad i_{\text{рТ}}, q \text{ и } d,$$

$$T_{\text{рТ}}, i_{\text{рТ}}, C_{\text{р рТ}} \quad \text{від} \quad s_{\text{рТ}}, q \text{ и } d,$$

$$T_{\text{рТ}}, i_{\text{рТ}}, s_{\text{рТ}} \quad \text{від} \quad C_{\text{р рТ}}, q \text{ и } d.$$

Вхідними параметрами в моделі вхідного пристрою (ВП) є: температура  $T_{\text{а}}$  і тиск  $P_{\text{а}}$  атмосферного повітря, зведена витрата повітря на виході вхідного пристрою  $G_{\text{вх вих}}$ .

Вихідними параметрами моделі даного вузла є: тиск  $P_{\text{вх вих}}$  і температура  $T_{\text{вх вих}}$  повітря на виході вихідного пристрою і зведена витрата повітря на його вході  $G_{\text{вх вх}}$ .

При розрахунку вихідних параметрів використовується характеристика вузла у вигляді коефіцієнта відновлення повного тиску у функції від зведеної витрати повітря на вході вузла  $\sigma_{ex} = f(G_{ex\ vx})$ .

Зведену витрату повітря на вході вхідного пристрою визначають з рівняння

$$G_{ex\ vx} = G_{ex\ vx} \cdot \sigma_{ex}(G_{ex\ vx}). \quad (4.29)$$

Тиск і температура повітря на виході вхідного пристрою відповідно дорівнюють

$$\begin{aligned} P_{ex\ vix} &= P_a \cdot \sigma_{ex}(G_{ex\ vx}), \\ T_{ex\ vix} &= T_a \cdot \sigma_{ex}(G_{ex\ vx}). \end{aligned} \quad (4.30)$$

Вхідними параметрами в моделі компресорів КНТ, КВТ є: тиск, температура і приведена витрата повітря на виході вхідного пристрою для моделі КНТ ( $P_{ex\ vix}$ ,  $T_{ex\ vix}$ ,  $G_{ex\ vix}$ ) або виході КНТ для моделі КВТ ( $P_{кнд\ vix}$ ,  $T_{кнд\ vix}$ ,  $G_{кнд\ vix}$ ), частота обертання валу компресора  $n_k(n_{кнд}, n_{квд})$ , відносний вологовміст повітря  $d$ .

Вихідними параметрами моделі компресора є: тиск  $P_{к\ vix}$ , температура  $T_{к\ vix}$  і зведена витрата повітря  $G_{к\ vix}$  на виході компресора. Для КНТ:  $P_{кнд\ vix}$ ,  $T_{кнд\ vix}$ ,  $G_{кнд\ vix}$ , а для КВТ:  $P_{квд\ vix}$ ,  $T_{квд\ vix}$ ,  $G_{квд\ vix}$ , питома робота компресора  $L_k(L_{кнд}, L_{квд})$ . При розрахунку вихідних параметрів моделі компресора використовують дві характеристики залежності ступеня підвищення тиску  $\pi_k(\pi_{кнд}, \pi_{квд})$  и ККТ  $\eta_k(\eta_{кнд}, \eta_{квд})$  від зведеної частоти обертання  $n_{к\ np}$  і зведеної витрати повітря  $G_{к\ np}$

$$n_{к\ np} = n_k \cdot \sqrt{\frac{T_{к\ vx\ н}}{T_{к\ vx}}}, \quad (4.31)$$

$$G_{к\ np} = G_k \cdot \sqrt{\frac{T_{к\ vx\ н}}{T_{к\ vx}}} \cdot \frac{P_{к\ vx\ н}}{P_{к\ vx}}, \quad (4.32)$$

де  $T_{к\ vx\ н}$ ,  $P_{к\ vx\ н}$  – номінальні значення температури і тиску повітря на вході компресора, що визначають умови зведення.

Характеристики  $\pi_k = f(n_{k np}, G_{k np})$  и  $\eta_{k np} = f(n_{k np}, G_{k np})$  задають у вигляді сукупності непарних ліній і ліній ККТ, що відповідають визначеним постійним значенням зведеної частоти обертання  $n_{k np}$ .

Вихідні параметри моделі компресора розраховують в наступній послідовності.

1. За допомогою процедури розрахунку теплофізичних властивостей робочого тіла за відомими параметрами повітря на вході в компресор визначають газову сталу  $R = R(T_{k vx}, d)$ , ентальпію  $i_{k vx} = i(T_{k vx}, d)$  і ентропію  $s_{k vx} = s(T_{k vx}, d)$ .

2. Обчислюють ентропію повітряного потоку на виході з компресора  $s_{k vix}$  і відповідну адіабатичну ентальпію  $i_{k vix}^{ad}$

$$s_{k vix} = s_{k vx} + R \ln \pi_k,$$

$$i_{k vix}^{ad} = i(s_{k vix}, d).$$

3. Визначаються вихідні параметри моделі компресора за наступними формулами

$$L_k = (i_{k vix}^{ad} - i_{k vx}) \cdot \frac{1}{\eta_k}, \quad (4.33)$$

$$i_{k vix} = i_{k vx} + L_k, \quad (4.34)$$

$$T_{k vix} = T(i_{k vix}, d), \quad (4.35)$$

$$P_{k vix} = \pi_k \cdot P_{k vx}, \quad (4.36)$$

$$G_{k vix} = G_{k vx} - \Delta G_k. \quad (4.37)$$

### Турбіни (ТВТ, ТНТ, СТ).

Вхідними параметрами в моделі турбін є: тиск  $P_{T vx}$ , температура  $T_{T vx}$  и зведена витратрата  $G_{T vx np}$  продуктів згоряння на вході турбіни (відповідно



для моделі ТВД:  $P_{\text{ТВД вх}}, T_{\text{ТВД вх}}, G_{\text{ТВД вх пр}}$ , для моделі ТНТ:  $P_{\text{ТНД вх}}, T_{\text{ТНД вх}}, G_{\text{ТНД вх пр}}$  і для моделі СТ:  $P_{\text{СТ вх}}, T_{\text{СТ вх}}, G_{\text{СТ вх пр}}$ , частота обертання турбіни  $n_{\text{Т}}(n_{\text{ТВД}}, n_{\text{ТНД}}, n_{\text{СТ}})$ , відносний вологовміст повітря  $d$  і відносний зміст продуктів згоряння паливного газу  $q_{\text{КС вих}}$ .

Вихідними параметрами моделі компресора є: тиск, температура і зведена витрата продуктів згоряння на виході турбіни  $P_{\text{Т вих}}, T_{\text{Т вих}}, G_{\text{Т вих пр}}$ , питома робота турбіни  $L(L_{\text{ТВД}}, L_{\text{ТНД}}, L_{\text{СТ}})$ .

При розрахунку вихідних параметрів моделі турбіни використовують дві характеристики: залежності зведеної витрати продуктів згоряння через сопловий апарат турбіни  $A_{\text{Т}}$  і ККТ  $\eta_{\text{Т}}$  від ступеня зниження тиску  $\pi_{\text{Т}}$  і зведеної частоти обертання  $n_{\text{Т пр}}$

$$A_{\text{Т}} = \frac{G_{\text{Т вх}} \cdot \sqrt{T_{\text{Т вх}}}}{P_{\text{Т вх}}}, \quad (4.38)$$

$$n_{\text{Т пр}} = \frac{n_{\text{Т}}}{\sqrt{T_{\text{Т вх}}}}. \quad (4.39)$$

Характеристики  $A_{\text{Т}} = f(n_{\text{Т пр}}, \pi_{\text{Т}})$  и  $\eta_{\text{Т}} = f(n_{\text{Т пр}}, \pi_{\text{Т}})$  задають у вигляді сукупності ліній  $A_{\text{Т}} = f(\pi_{\text{Т}})$  и  $\eta_{\text{Т}} = f(\pi_{\text{Т}})$ , що відповідають обчисленим постійним значенням зведеної частоти обертання  $n_{\text{Т пр}}$ .

Вихідні параметри моделі турбіни розраховують в наступній послідовності.

1 За допомогою процедури розрахунку теплофізичних властивостей робочого тіла за відомим значенням відносного вологовмісту повітря  $d$  і відносного змісту продуктів згоряння паливного газу визначають газову сталу  $R = R(T_{\text{Т вх}}, d, q_{\text{КС вих}})$ , ентальпію  $i_{\text{Т вх}} = i(T_{\text{Т вх}}, d, q_{\text{КС вих}})$  і ентропію  $s_{\text{Т вх}} = s(T_{\text{Т вх}}, d, q_{\text{КС вих}})$ .

2 Обчислюють ентропію продуктів згоряння на виході з турбіни  $s_{T \text{ вих}}$  і відповідну адіабатичн ентальпію  $i_{T \text{ вих}}^{ad}$

$$s_{T \text{ вих}} = s_{T \text{ вх}} - R \ln \pi_T, \quad (4.40)$$

$$i_{T \text{ вих}}^{ad} = i(s_{T \text{ вих}}, d, q_{\text{КС вих}}). \quad (4.41)$$

3 Визначають вихідні параметри моделі турбіни за наступними формулами

$$L_T = (i_{T \text{ вх}} - i_{T \text{ вих}}^{ad}) \cdot \eta_T, \quad (4.42)$$

$$i_{T \text{ вих}} = i_{T \text{ вх}} - L_T, \quad (4.43)$$

$$T_{T \text{ вих}} = T(i_{T \text{ вих}}, d, q_{\text{КС вих}}), \quad (4.44)$$

$$P_{T \text{ вих}} = \frac{P_{T \text{ вх}}}{\pi_T}, \quad (4.45)$$

$$G_{T \text{ вих пр}} = A_T - \Delta G_T. \quad (4.46)$$

### **Камера згоряння.**

Вхідними параметрами моделі камери згоряння є: відносний зміст продуктів згоряння  $q_{\text{КС вх}}$ , відносний вологовміст  $d$ , температура  $T_{\text{КС вх}}$  і витрата  $G_{\text{КС вх}}$  робочого тіла (повітря і природного газу) на вході в камеру згоряння, температура продуктів згоряння на виході з камери згоряння  $T_{\text{КС вих}}$  і коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha_{\text{КС}}$ .

Вихідними параметрами моделі є: відносний зміст продуктів згоряння  $q_{\text{КС вих}}$ , витрата продуктів згоряння  $G_{\text{КС вих}}$  на виході камери згоряння і коефіцієнт повноти згоряння  $\eta_{\text{КС}}$ .

При розрахунку вихідних параметрів використовують залежність коефіцієнта повноти згоряння  $\eta_{\text{КС}}$  від коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha_{\text{КС}}$   $\eta_{\text{КС}} = f(\alpha_{\text{КС}})$ .

Послідовність обчислень у моделі камери згоряння наступна:

1 За допомогою процедури розрахунку теплофізичних властивостей робочого тіла визначають ентальпію робочого тіла на вході камери згоряння  $i_{\text{КС вх}} = i(T_{\text{КС вх}}, d, q_{\text{КС вх}})$ , ентальпію робочого тіла на виході камери згоряння  $i_{\text{КС вих}} = i(T_{\text{КС вих}}, d, q_{\text{КС вих}})$  і ентальпію природного газу на виході з камери згоряння  $i_{\text{КС пг}} = i(T_{\text{КС вих}}, 0, 1)$ .

2 Визначають коефіцієнт повноти згоряння у функції від коефіцієнта надлишку повітря  $\eta_{\text{КС}} = f(\alpha_{\text{КС}})$ .

3 розраховують вихідні параметри моделі камери згоряння за наступними формулами

$$q_{\text{КС вих}} = \frac{(1 + q_{\text{КС вх}} + d) \cdot (i_{\text{КС вих}} - i_{\text{КС вх}})}{H_u \cdot \eta_{\text{КС}} - i_{\text{КС пг}} + i_0}, \quad (4.47)$$

де  $H_u$  – нижча теплотворна здатність палива,

$i_0$  – ентальпія природного газу на вході в камеру згоряння.

На основі описаних моделей вузлів ГТУ, системи нев'язок, алгоритмів вирішення системи нев'язок і отриманих індивідуальних характеристик вузлів установки розроблена повузлова модель ГТУ потужністю 10 *MBm*.

Для оцінки похибки розрахунку параметрів і характеристик ГТУ за допомогою повузлової моделі розрахована потужносна характеристика ГТУ потужністю 10 *MBm* і проведено порівняльний аналіз з паспортною потужносною характеристикою. Результати порівняльного аналізу і точка номінального режиму роботи ГТУ. відображені на рис.4.12.

У табл.4.4 подані параметри номінального режиму, що відповідають ТУ заводу-виготовлювача ГТУ потужністю 10 МВТ і параметри, розраховані за повузловою моделлю.

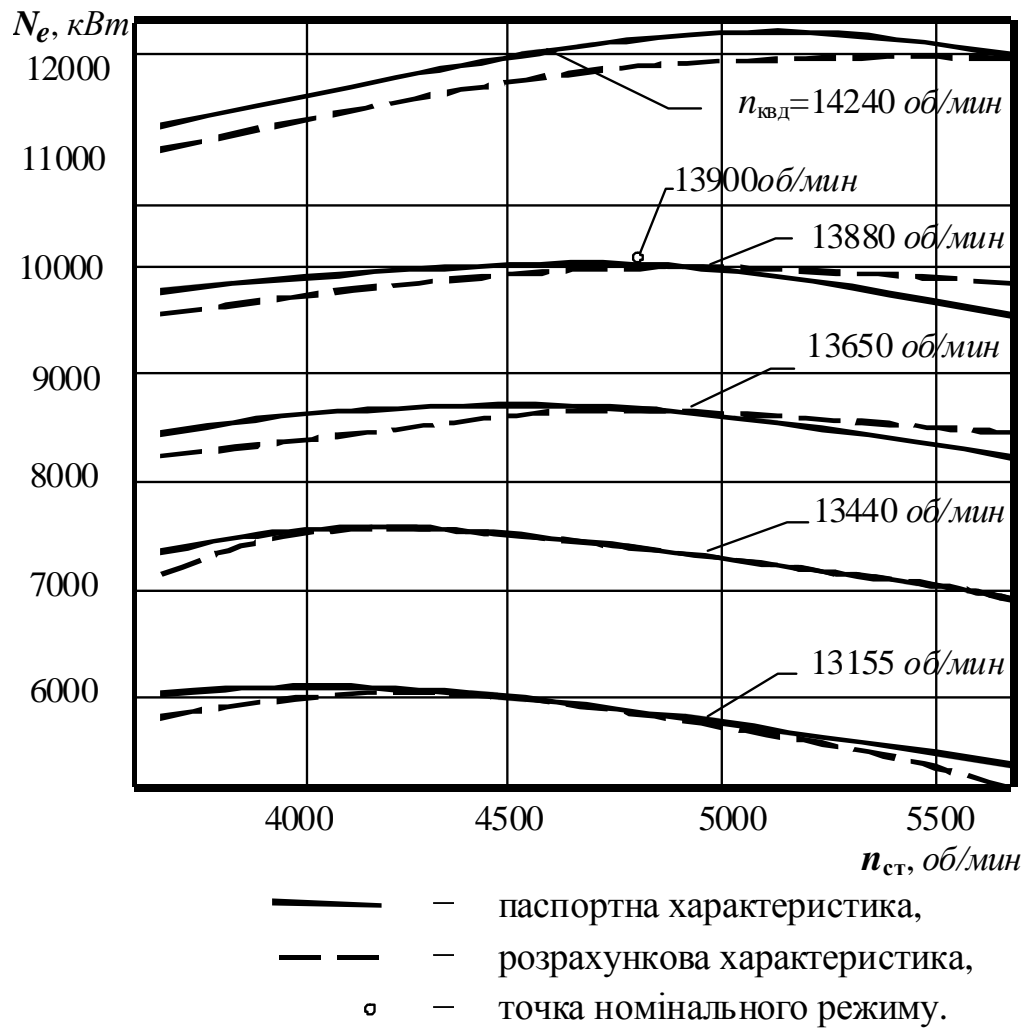


Рис.4.12 – Розрахункова і паспортна характеристики ГТУ потужністю 10 МВт

Таблиця 4.4 – Параметри номінального режиму ГТУ потужністю 10 МВт

	$N_{\text{ст}}$	$\eta_e$	$n_{\text{вд}}$	$n_{\text{нд}}$	$n_{\text{ст}}$	$\pi_{\text{к}\Sigma}$	$t_{\text{ТНД}}^*$	$C_e$
	кВт	%	об/хв	об/хв	об/хв		°C	кз/(кВт·ч)
Параметри, що розраховані за повузловою моделлю	10070	36,0	13900	10075	6500	20,9	660	0,199
Параметри ТУ заводу-виготовлювача	10000	34,0	13900	10095	6500	20,5	650	0,212

З аналізу результатів, що наведені на рис.4.12 випливає, що максимальне відхилення розрахункової характеристики від паспортної у всьому

діапазоні робочих режимів ГТУ не перевищило 5 %. Відхилення значення потужності, розрахованої за універсальною повузловою моделлю від значення наведеної в ТУ заводом-виготовлювачем на номінальному режимі (табл.4.5) не перевищило 1 %.

Застосування повузлової моделі дозволяє визначити залежності змін контрольованих параметрів ГТУ від зміни базового параметра, а також від виду і величини дефекту в кожному з вузлів установки. На основі отриманих залежностей визначають узагальнені нормовані дефекти ГТУ і її розрахункові зведені характеристики.

#### **4.3. РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ФТС ГТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОВУЗЛОВОЇ МОДЕЛІ**

Оцінку точності визначення ФТС ГТУ за допомогою повузлової моделі виконували шляхом моделювання різних видів дефектів у різних вузлах. У результаті моделювання визначали контрольовані параметри, за якими, використовуючи запропонований метод без урахування похибки каналів вимірів обчислювали фактичні характеристики і режимні параметри ГТУ (потужність, витрата паливного газу і ККД). Моделювали різний ступінь розвитку дефекту в КНТ ГТУ і дефекти в інших вузлах ГТУ на номінальному режимі роботи.

За допомогою повузлової моделі ГТУ моделювався дефект у КНТ ГТУ, що викликав зменшення ККД і ступеня підвищення тиску на два відсотки  $\Delta\eta = 2\%$  и  $\Delta p = 2\%$ . У табл.4.5 наведено значення потужності, ККД і витрати паливного газу, розраховані за допомогою повузлової моделі ГТУ без дефектів і ГТУ з дефектом КНТ.

Як програму регулювання ГТУ приймали наступну програму:  $n_{вд} = \text{const}$  і  $n_{ст} = \text{const}$ . Базовим параметром, відносно якого виконувались розрахунки, обирали частоту обертання ТВД  $n_{вд}$ . У табл.4.6 наведені результати відхилення контрольованих параметрів з нульовими значеннями дефектів ГТУ і ГТУ з модельованим дефектом.

Таблиця 4.5 – Значення параметрів ГТУ, розрахованих за допомогою  
повузлової моделі ГТУ без дефектів і ГТУ з дефектом

№ п/п	Параметри ГТУ	Режим № 1 ( $n_{вд}= 13100$ <i>об/хв</i> )	Режим № 2 ( $n_{вд}= 13500$ <i>об/хв</i> )	Режим № 3 ( $n_{вд}= 13900$ <i>об/хв</i> )	Режим № 4 ( $n_{вд}= 14300$ <i>об/хв</i> )
1	2	3	4	5	6
1	Потужність ГТУ без дефектів, <i>кВт</i>	5259,64	7444,71	9732,46	11863,21
2	Потужність ГТУ з дефектом в КНТ, <i>кВт</i>	4804,54	6905,64	9257,65	11674,79
3	Відхилення потужності ГТУ с дефектом КНТ від ГТУ без дефектів, %	– 8,6	– 7,2	– 4,9	– 1,6
4	Витрати паливного газу ГТУ без дефектів, <i>кг/год</i>	1368,74	1713,91	2074,14	2445,81
5	Витрати паливного газу ГТУ з дефектом в КНТ, <i>кг/год</i>	1312,71	1649,28	2019,32	2424,77
6	Відхилення витрат паливного газу ГТУ з дефектом КНТ від ГТУ без дефектів, %	– 4,1	– 3,8	– 2,6	– 0,9
7	ККД ГТУ без дефектів	0,276	0,312	0,337	0,349
8	ККД ГТУ з дефектом в КНТ	0,263	0,301	0,33	0,346
9	Відхилення ККД ГТУ з дефектом КНТ від ГТУ без дефектів, %	– 4,7	– 3,5	– 2,1	– 0,9

Таблиця 4.6 – Порівняння контрольованих параметрів ГТУ без дефектів і ГТУ з дефектом

№ п/п	Параметри ГТУ	Режим № 1 ( $n_{вд}=13100$ об/хв)	Режим № 2 ( $n_{вд}=13500$ об/хв)	Режим № 3 ( $n_{вд}=13900$ об/хв)	Режим № 4 ( $n_{вд}=14300$ об/хв)
1	2	3	4	5	6
1	Температура повітря на вході в ГТУ, К	288,15	288,15	288,15	288,15
2	Тиск повітря на вході в ГТУ, $кг/см^2$	1,0332	1,0332	1,0332	1,0332
3	Частота обертання ротора СТ ГТУ, об/хв	6500	6500	6500	6500
4	Частота обертання ротора ТВТ ГТУ, об/хв	13100	13500	13900	14300
5	Тиск повітря за компресором ГТУ без дефектів, $кг/см^2$	15,724	18,84	21,634	24,031
6	Тиск повітря за компресором ГТУ з дефектом в КНТ, $кг/см^2$	15,106	18,041	20,969	23,761
7	Відхилення тиску повітря за компресором ГТУ з дефектом в КНТ ГТУ без дефектів, %	– 4,68	– 4,2	– 3,07	– 1,1
8	Частота обертання ротора ТНТ ГТУ без дефектів, об/хв	8852	9449	10062	10651
9	Частота обертання ротора ТНТ ГТУ з дефектом в КНТ, об/хв	8708	9277	9882	10547
10	Відхилення частоти обертання ротора ТНТ ГТУ з дефектом в КНТ від ГТУ без дефектів, %	– 1,6	– 1,8	– 1,8	– 0,97
11	Зведена температура газу за ТНТ ГТУ без дефектів, К	849,57	891,28	936,38	989,96
12	Зведена температура газу за ТНТ ГТУ з дефектом в КНТ, К	846,03	888,37	933,36	987,89
13	Відхилення температури газу за ТНТ ГТУ з дефектом в КНТ від ГТУ без дефектів, %	– 0,4	– 0,3	– 0,3	– 0,2

Результати порівняння значень потужності, витрати паливного газу і ККД ГТУ, розрахованих за допомогою повузлової моделі та за пропонованим методом на підставі обчислення узагальненого дефекту проточної частини на різних режимах роботи ГТУ наведені в табл.4.7.

Таблиця 4.7 – Результати порівняння значень параметрів ГТУ, отриманих за повузловою моделлю і за пропонованим методом

№ п/п	Параметри ГТУ	Режим № 1 ( $n_{вд}=13100$ об/хв)	Режим № 2 ( $n_{вд}=13500$ об/хв)	Режим № 3 ( $n_{вд}=13900$ об/хв)	Режим № 4 ( $n_{вд}=14300$ об/хв)
1	2	3	4	5	6
1	Витрати паливного газу ГТУ, отримані за повузловою моделлю, $кг/год$	1312,7	1649,3	2019,32	2424,76
2	Витрати паливного газу ГТУ, розраховані за пропонованим методом, $кг/год$	1303,36	1641,88	2000,85	2400,33
3	Відхилення витрат паливного газу ГТУ, обчислених за повузловою моделлю, відносно розрахованого за пропонованим методом, %	- 0,7	- 0,45	- 0,9	- 1,0
4	Потужність на валу СТ ГТУ, розрахована за повузловою моделлю, $кВт$	4804,5	6905,6	9257,7	11674,8
5	Потужність на валу СТ ГТУ, розрахована за пропонованим методом, $кВт$	4848,1	6985,5	9276,89	11616,94
6	Відхилення потужності на валу СТ ГТУ, отриманої за повузловою моделлю, відносно розрахованої за пропонованим методом, %	0,9	1,12	0,21	- 0,5
7	ККД ГТУ, отриманий за повузловою моделлю ГТУ	0,263	0,301	0,33	0,346
8	ККД ГТУ, розрахований за пропонованим методом	0,267	0,306	0,33	0,348
9	Відхилення ККД ГТУ, розрахованого за повузловою моделлю ГТУ, відносно розрахованого за пропонованим методом, %	1,5	1,6	0	0,58

Як впливає з наведених результатів, відхилення значень потужності, ККД і витрати паливного газу, розрахованих за допомогою запропонованого методу відносно модельованих, не перевищують за ККД 1,6 %, за потужністю - 1,2 % і за витратам паливного газу - 1 %. Точність розрахунку цих параметрів тим вище, чим ближче режим роботи ГТУ до номінального.

Для перевірки вірогідності пропонованого методу оцінки ФТС ГТУ за повузловою моделлю ГТУ також моделювали різну ступінь розвитку дефекту в КНТ ГТУ і дефекти в інших вузлах ГТУ на номінальному режимі роботи.



Результати розрахунків і оцінка точності визначення параметрів ГТУ наведені в табл.4.8 и 4.9.

Як випливає з аналізу результатів табл.4.8, у випадку збільшення модельованого дефекту КНТ, що знижує ККД і міру стиснення в компресорі до 3 % на номінальному режимі роботи ГТУ, максимальні відхилення результатів розрахунків параметрів ГТУ за запропонованим методом від модельованих значень не перевищили 1 % .

З аналізу результатів таблиці 4.9 випливає, що найбільші відхилення параметрів, що розраховують від модельованих спостерігаються при наявності дефектів у КВД і ТВТ ГТУ. Однак, як показує практика експлуатації ГПА, найбільш підверженими до псування вузлами ГТУ є КНТ і СТ. При моделюванні дефектів у цих вузлах, величина яких приводила до зниження ККД і міри стиснення до 2 %, відхилення значень потужності, що розраховують, і ККД ГТУ від модельованих не перевищило 1 %, а витрати паливного газу - 2 %. У цілому відхилення розрахованих параметрів ГТУ за запропонованим методом від модельованих при наявності дефектів у різних вузлах не перевищило за ККД ГТУ - 3 %, за потужністю - 6,5 % і за витратами паливного газу - 4 %.

У даному розділі наведені результати перевірки вірогідності оцінки ФТС ГТУ шляхом порівняння значень потужності, розрахованих відповідно до запропонованого методу за даними агрегатної автоматики, з відповідними значеннями потужності, розрахованими за параметрами ВЦН за методом оцінки ФТС ВЦН на основі узагальненого нормованого дефекту.

Перевірка проводилась в два етапи.

На першому етапі перевірка полягала в обробці сукупності даних агрегатної автоматики ГТУ АІ-336-8 із ВЦН НЦ-6,3-125. На підставі цих даних за допомогою запропонованого методу визначення ФТС ГТУ і методу оцінки ФТС ВЦН на основі узагальненого нормованого дефекту [22, 24, 30], розраховували значення потужності ГТУ для шести режимів роботи ГПА. Результати розрахунків, отримані приймальною комісією ДК "Укртрансгаз", наведені в табл.4.10. Значення потужності ГТУ в цій таблиці розраховували за одиничним вектором вимірів контрольованих параметрів, а також за серією вимірів.

Таблиця 4.8 – Параметри ГТУ при різній ступені розвитку дефекту в КНТ

Параметри ГТУ		$\Delta\eta_{\text{КНТ}} = 0,5 \text{ \%},$ $\Delta\pi_{\text{КНТ}} = 0,5 \text{ \%}$	$\Delta\eta_{\text{КНТ}} = 1 \text{ \%},$ $\Delta\pi_{\text{КНТ}} = 1 \text{ \%}$	$\Delta\eta_{\text{КНТ}} = 2 \text{ \%},$ $\Delta\pi_{\text{КНТ}} = 2 \text{ \%}$	$\Delta\eta_{\text{КНТ}} = 3 \text{ \%},$ $\Delta\pi_{\text{КНТ}} = 3 \text{ \%}$
Зведена витрата паливного газу ГТУ	Модельована, <i>кг/год</i>	2121,2	2129,077	2140,4587	2152,579
	Розраховочна, <i>кг/год</i>	2126,5	2133,49	2147,694	2162,8249
	Відносна похибка розрахунку, <i>%</i>	0,2	0,2	0,3	0,5
Зведена потужність на валу ротора СТ ГТУ	Модельована, <i>кВт</i>	10000,0	10000,0	10000,0	10000,0
	Розраховочна, <i>кВт</i>	10013,98	10004,5	10039,38	9963,96
	Відносна похибка розрахунку, <i>%</i>	0,14	0,05	0,39	– 0,38
ККД ГТУ	Модельований	0,339	0,338	0,336	0,334
	Розраховочний	0,3387	0,337	0,336	0,3313
	Відносна похибка розрахунку, <i>%</i>	– 0,09	– 0,3	0,0	– 0,8

Таблиця 4.9 – Параметри ГТУ при наявності дефектів у різних її вузлах

Параметри ГТУ		$\Delta\eta_{\text{КВД}} = 2 \%,$ $\Delta\pi_{\text{КВД}} = 2 \%$	$\Delta\eta_{\text{ТНТ}} = 2 \%,$ $\Delta\pi_{\text{ТНТ}} = 2 \%$	$\Delta\eta_{\text{ТВТ}} = 2 \%,$ $\Delta\pi_{\text{ТВТ}} = 2 \%$	$\Delta\eta_{\text{СТ}} = 2 \%,$ $\Delta\pi_{\text{СТ}} = 2 \%$
Зведена витрата паливного газу ГТУ	Модельована, $\text{кг/год}$	2175,11	2151,4714	2142,37	2153,1241
	Розраховочна $\text{кг/ч}$	2091,39	2147,549	2072,029	2149,4259
	Відносна похибка розрахунку, %	3,8	1,8	3,3	1,7
Зведена потужність на валу СТ ГТУ	Модельована $\text{кВт}$	10000	10000	10000	10000
	Розраховочна $\text{кВт}$	9591,38	9933,39	9394,99	10017,8457
	Відносна похибка розрахунку, %	– 4,1	– 0,77	– 6,05	0,18
ККД ГТУ	Модельований	0,331	0,334	0,336	0,334
	Розраховочний	0,3298	0,3326	0,326	0,335
	Відносна похибка розрахунку, %	– 0,36	– 0,42	– 2,99	0,3

Таблиця 4.10 – Порівняння значень потужності, обчислених за пропонованим методом, з розрахованими за параметрами ВЦН на різних режимах роботи ГПА

Режим	Потужність ГТУ, що розрахована за пропонованим методом, кВт		Потужність ГТУ, що розрахована за параметрами ВЦН, кВт	Відносна похибка розрахунку потужності, %	
	за одиничними вимірами	за серією вимірів		за одиничними вимірами	за серією вимірів
1	5031,43	5181,64	5176	– 2,79	0,11
2	5988,37	6179,16	6294	– 4,86	– 1,82
3	6146,65	6242,03	6373	– 3,55	– 2,06
4	4759,68	4784,51	4887	– 2,61	– 2,1
5	4940,05	4773,76	4784	3,26	– 0,21
6	6014,37	6007,94	5976	0,64	0,53

Як впливає з табл.4.10, відхилення значень потужності, обчислених за параметрами ГТУ з використанням запропонованого методу від значень потужності, розрахованих за параметрами ВЦН, не перевищили 5 % при розрахунках за одиничним вектором вимірів для шести режимів роботи ГПА, і 3 % - за серією вимірів. Отримані результати свідчать про досить високу вірогідність оцінок ФТС ГТУ запропонованим методом.

На другому етапі перевіряли вірогідність визначення оцінок ФТС ГТУ на ряді КС, що мають різні типи ГТУ. В табл.4.11 наведені розраховані значення потужності для різних типів ВЦН і ГТУ.

Перевірка вірогідності визначення оцінок ФТС ГТУ на цьому етапі аналогічна перевірці, проведеній на першому етапі.

Аналізуючи результати, наведені в табл.4.11, слід зазначити, що максимальна величина відхилення потужності, розрахованої запропонованим методом, від відповідних значень потужності, розрахованих за параметрами ВЦН, не перевищила 8 % для різних типів ГТУ. Така похибка зафіксована на одному з режимів роботи ГТУ ГТ-750-6. В інших випадках розбіжності в значеннях потужності не перевищили 3-4 %.

Таблиця 4.11 – Розраховочні значення потужності ВЦН і ГТУ різних типів

№ п/п	Тип ВЦН	Тип ГТУ	Дата	Частота обертання ротора СТ, <i>об/хв</i>	Потужність ВЦН, <i>кВт</i>	Потужність ГТУ, <i>кВт</i>	Відносна похибка розрахунку потужності, %
1	2	3	4	5	6	7	8
1	520-12-1 (3)	ГТК-10-4	20.10.2002	4330	7083,0	7026,3	0,801
2	520-12-1 (3)	ГТК-10-2	22.12.2002	4250	6164,0	6002,5	2,620
3	520-12-1 (3)	ГТК-10-2	24.12.2002	4200	5988,0	5793,4	3,250
4	520-12-1 (3)	ГТК-10-2	27.12.2002	4300	6270,0	6189,2	1,289
5	520-12-1 (3)	ГТК-10-2	28.12.2002	4200	6702,0	6657,6	0,662
6	520-12-1 (3)	ГТК-10-2	01.01.2003	4200	7383,0	7309,5	0,995
7	520-12-1 (3)	ГТК-10-2	02.01.2003	4200	7359,0	7198,6	2,180
8	Н-6-56	ГТН-6	02.09.2002	5100	4531,0	4404	2,803
9	Н-6-56	ГТН-6	03.09.2002	5100	4532,0	4486,7	0,999
10	Н-6-56	ГТН-6	05.09.2002	5100	4455,0	4432,3	0,509
11	Н-6-56	ГТН-6	11.09.2002	5500	4751,0	4601,6	3,145
12	Н-6-56	ГТН-6	12.09.2002	5600	4877,0	4752,1	2,561
13	Н-6-56	ГТН-6	13.09.2002	5600	4986,0	4869,2	2,343
14	Н-6-56	ГТН-6	14.09.2002	5650	5054,0	5004,1	0,987
15	Н-6-56	ГТН-6	15.09.2002	5300	4970,0	4887,9	1,652
16	Н-6-56	ГТН-6	16.09.2002	5300	4674,0	4612,8	1,309
17	Н-300-1,23	ГТ-750-6	21.08.1999	5030	3631,0	3576,2	1,509
18	370-14-1	ГТ-750-6	13.10.2002	4400	3679,0	3501,3	4,830
19	370-14-1	ГТ-750-6	15.10.2002	4400	3905,0	3799,9	2,691
20	370-14-1	ГТ-750-6	16.10.2002	4400	3989,0	3855,3	3,352
21	370-14-1	ГТ-750-6	23.10.2002	4300	4104,0	4002,9	2,463
22	370-14-1	ГТ-750-6	24.10.2002	4300	4250,0	4111,8	3,252
23	370-14-1	ГТ-750-6	26.10.2002	4300	4298,0	4138,3	3,716
24	370-14-1	ГТ-750-6	27.10.2002	4300	4511,0	4177,4	7,395
25	370-14-1	ГТ-750-6	29.10.2002	4300	4503,0	4456,1	1,041
26	370-14-1	ГТ-750-6	30.10.2002	4300	4430,0	4339,9	2,034

## **5. МОНИТОРИНГ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПАРКУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ**

### **5.1. ЗАДАЧІ МОНИТОРИНГУ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВЛЬНИХ АГРЕГАТІВ СИСТЕМИ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ УКРАЇНИ**

Розвиток запропонованих підходів до оцінки ФТС ВЦН і ГТУ в сполученні з широким упровадженням цифрових САК ГПА, САК КЦ сучасних комплексів по збору й обробці інформації з компресорних станцій дозволяють розробити цілісну систему моніторингу ФТС ГПА системи магістральних газопроводів України. У зв'язку з цим вирішуються задачі оперативного визначення, збереження, відновлення і використання фактичних характеристик всього експлуатованого парку ГПА на всіх рівнях керування газотранспортною системою.

Розв'язувані задачі моніторингу ФТС ВЦН і ГТУ залежать від рівня керування газотранспортною системою.

На рівні КС моніторинг ФТС здійснюють за інформацією агрегатної і цехової автоматики експлуатованих ГПА. Результати моніторингу використовують для вирішення задач:

- розрахунку фактичних характеристик і режимних параметрів кожного ГПА;
- визначення фактичних характеристик ВЦН і ГТУ після проведення ремонту й оцінка якості проведеного ремонту;
- визначення області припустимих режимів роботи ГПА і розрахунок запасу до помпажу;
- визначення істотних змін режимних параметрів ГПА і прогнозування їхньої зміни на інтервал часу, що задається;
- розрахунку норми витрат паливного газу за фактичним ФТС;
- оптимізації роботи КЦ на основі фактичного ФТС.

Вхідною інформацією моніторингу ФТС ГПА на середньому рівні керування (рівні УМГ) є:

- інформація цехової та агрегатної автоматики КС, що надходить в УМГ через канали телемеханіки;
- результати визначення ФТС ГПА по КС;
- результати теплотехнічних випробувань;
- середньодобові дані диспетчерських журналів.
- За результатами моніторингу вирішують наступні задачі:
- розрахунку уточнених фактичних характеристик ВЦН і ГТУ;
- видачі рекомендацій обслуговуючому персоналові КС про проведення чергових ремонтів;
- розрахунку норми витрат паливного газу за фактичним ФТС всіх типів ГПА, що в експлуатують на КС;
- порівняльного аналізу перевитрат паливного газу і виявлення причин перевитрат;
- аналізу ФТС ВЦН і ГТУ в рамках УМГ за однойменними типами.

Основною вхідною інформацією моніторингу ГПА на верхньому рівні керування є результати моніторингу на рівні УМГ і середньодобові дані диспетчерських журналів. Моніторинг ФТС ГПА на верхньому рівні керування вирішує наступні задачі:

- моніторинг ФТС всіх ГПА ДК "Укртрансгаз", що знаходяться в експлуатації;
- ведення бази даних про технічний стан всіх ВЦН і ГТУ, що експлуатуються;
- розрахунку норми витрати паливного газу за фактичним ФТС усіх типів ГПА;
- порівняльного аналізу перевитрат паливного газу однойменними типами ГПА, які приведені до типових умов роботи;
- оцінки показників роботи УМГ;
- виявлення причин перевитрат паливного газу по окремих УМГ;
- формування норм енерговитрат по ДК "Укртрансгаз";
- аналізу ФТС ВЦН і ГТУ по ДК "Укртрансгаз" і формування рекомендацій щодо реновації агрегатів.

## 5.2. МОНИТОРИНГ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ НА РІВНІ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ

Задача моніторингу ФТС ГПА вирішують у складі задач підсистеми функціональної діагностики САК(системи автоматизованого керування) КЦ.

Фактичні характеристики і режимні параметри ВЦН і ГТУ на рівні КС визначають з періодами від 2 секунд до 1 хвилини. При цьому оцінки ФТС ВЦН визначають на основі газодинамічного розрахунку, а по ГТУ - на основі обчислення узагальнених нормованих дефектів проточної частини (розд.4). На даному рівні визначають також коефіцієнти технічного стану, які дозволяють акцентувати увагу на роботі ГПА з найменшими значеннями КТС за ККД.

Відмінною рисою визначення КТС ВЦН і ГТУ є те, що ці коефіцієнти розраховуються безпосередньо за фактичними і паспортними характеристиками для заданих значень комерційної продуктивності ВЦН  $\{Q_{ком t}\}$  і частот обертання ТНТ  $\{n_{тнд l}\}$ .

Фактичні характеристики ВЦН і ГТУ розраховуються на основі методів, що описані у розділах 2 і 4.

Метод розрахунку КТС ВЦН за фактичними характеристиками складається з реалізації наступних дій.

Визначають масив значень зведеної об'ємної продуктивності  $\{Q_{np t}\}$  в функції від  $\{Q_{ком t}\}$ . Для кожного значення  $Q_{ком t}$  обчислюють  $Q_{np t}$  за формулою:

$$Q_{np t} = \frac{n_n \cdot P_{st} \cdot T_{np} \cdot Z_{np} \cdot Q_{ком t}}{0,00144 \cdot n \cdot T_{st} \cdot (P_{ex np} + P_a)}, \quad (5.1)$$

де  $P_{st} = 1,0329 \text{ кг/см}^2$ ,  $T_{st} = 293,15 \text{ К}$ ,

$P_{ex np}$  – зведений тиск газу на вході ВЦН.

Значення  $P_{ex np}$  визначається через параметри зведення  $Z_{np}$ ,  $R_{np}$ ,  $T_{np}$  з рішення модифікованого рівняння стану "Бенедикта-Вебба-Рабіна".

Далі, за паспортними й фактичними характеристиками (політропного ККД і зведеної відносної внутрішньої потужності) визначають відповідно наступні масиви:

– паспортних значень ККД  $\{\eta_{пол}^n(Q_{np t})\}$ ;



- паспортних значень зведеної відносної внутрішньої потужності  $\left\{ \left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np}^{\Pi} (Q_{np\ t}) \right\};$
- фактичних значень ККД  $\{ \eta_{пол}^f (Q_{np\ t}) \};$
- фактичних значень зведеної відносної внутрішньої потужності  $\left\{ \left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np}^f (Q_{np\ t}) \right\}.$

КТС обчислюють як відношення відповідних фактичних параметрів до паспортних:

$$K_{\eta}^{ВЦН} (Q_{ком\ t}) = \frac{\eta_{пол}^f (Q_{np\ t})}{\eta_{пол}^{\Pi} (Q_{np\ t})}, \quad (5.2)$$

$$K_N^{ВЦН} (Q_{ком\ t}) = \frac{\left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np}^f \cdot (Q_{np\ t})}{\left[ \frac{N}{\rho} \right]_{np}^{\Pi} \cdot (Q_{np\ t})}. \quad (5.3)$$

Середньозважені КТС ВЦН обчислюють за формулами 5.4 і 5.5 для трьох значень комерційної продуктивності  $Q_{ком\ t}$ ,  $t = \{ном, min, max\}$ .

- середньозважений КТС ВЦН за потужністю:

$$K_{N\ cр}^{ВЦН} = \frac{1}{3} \cdot \sum_t K_N^{ВЦН} (Q_{ком\ t}); \quad (5.4)$$

- середньозважений КТС ВЦН за ККД:

$$K_{\eta\ cр}^{ВЦН} = \frac{1}{3} \cdot \sum_t K_{\eta}^{ВЦН} (Q_{ком\ t}). \quad (5.5)$$

КТС ГТУ пропонується розраховувати за аналогічною схемою. Основою для розрахунку є паспортні і фактичні дросельні характеристики. За цими характеристиками і заданому масиві значень частоти обертання ТНТ  $\{n_{тнд\ t}\}$ ,  $t = \overline{1, 3}$  визначають наступні масиви паспортних і фактичних значень:

- ефективної потужності:  $\{ N_e^{\Pi} (n_{тнд\ t}) \}$  і  $\{ N_e^f (n_{тнд\ t}) \};$
- ефективного ККД:  $\{ \eta_e^{\Pi} (n_{тнд\ t}) \}$  і  $\{ \eta_e^f (n_{тнд\ t}) \}.$

КТС ГТУ за потужністю та ефективним ККД розраховують як

$$K_N^{\Gamma\text{ТУ}}(n_{\text{ТНД}t}) = \frac{N_e^f(n_{\text{ТНД}t})}{N_e^{\Pi}(n_{\text{ТНД}t})}, \quad (5.6)$$

$$K_{\eta}^{\Gamma\text{ТУ}}(n_{\text{ТНД}t}) = \frac{\eta_e^f(n_{\text{ТНД}t})}{\eta_e^{\Pi}(n_{\text{ТНД}t})}. \quad (5.7)$$

КТС ГТУ за паливним газом обчислюють за формулою:

$$K_{\text{ТГ}}^{\Gamma\text{ТУ}}(n_{\text{ТНД}t}) = \frac{1}{K_{\eta}^{\Gamma\text{ТУ}}(n_{\text{ТНД}t})} \cdot (0,75 \cdot K_N^{\Gamma\text{ТУ}}(n_{\text{ТНД}t}) + 0,25 \cdot \sqrt{\frac{t_a + 273,15}{288,15}} \cdot \frac{P_a}{P_{st}}). \quad (5.8)$$

Формула (5.8) отримана відповідно наступній формулі розрахунку витрат паливного газу [48]:

$$G_{\text{ТГ}} = G_{\text{ТГ} \text{ КОМ}} \cdot K_q \cdot (0,75 \cdot \frac{N_e^f}{N_e^{\Pi}} + 0,25 \cdot \sqrt{\frac{t_a + 273,15}{288,15}} \cdot \frac{P_a}{P_{st}}), \quad (5.9)$$

де  $K_q$  – коефіцієнт, що враховує зміну питомих витрат паливного газу в залежності від технічного стану ГТУ.

КТС ГТУ за паливним газом зведений до станційних умов (ДГСТ 28775) обчислюють за формулою (5.8) .

Крім того, визначають середньозважені КТС ГТУ для трьох значень базового параметру  $n_{\text{ТНД}t}$ , 1.,  $t = 1, 2, 3$ .

– середньозважений КТС ГТУ за потужністю

$$K_{Ncp}^{\Gamma\text{ТУ}} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{t=1}^3 K_N^{\Gamma\text{ТУ}}(n_{\text{ТНД}t}); \quad (5.10)$$

– середньозважений КТС ГТУ за витратами паливного газу

$$K_{\text{ТГ}cp}^{\Gamma\text{ТУ}} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{t=1}^3 K_{\text{ТГ}}^{\Gamma\text{ТУ}}(n_{\text{ТНД}t}); \quad (5.11)$$

– середньозважений КТС ГТУ за ефективним ККД

$$K_{\eta cp}^{\Gamma\text{ТУ}} = \frac{1}{3} \cdot \sum_{t=1}^3 K_{\eta}^{\Gamma\text{ТУ}}(n_{\text{ТНД}t}). \quad (5.12)$$

Графічні ілюстрації схеми визначення паспортних і фактичних режимних параметрів ВЦН і ГТУ представлені відповідно на рис.5.1 і 5.2. На цих рисунках суцільною лінією відображені фактичні характеристики, а переривчастою - паспортні характеристики ВЦН і ГТУ.

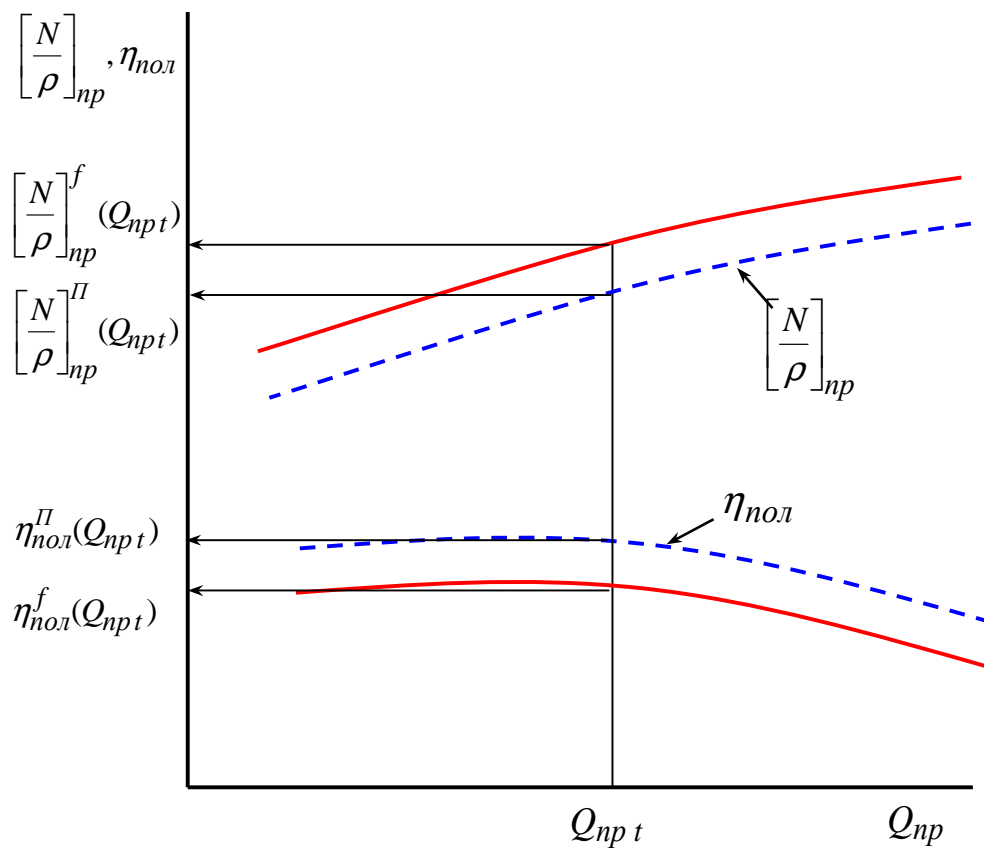


Рис.5.1 – Паспортна і фактична характеристики ВЦН

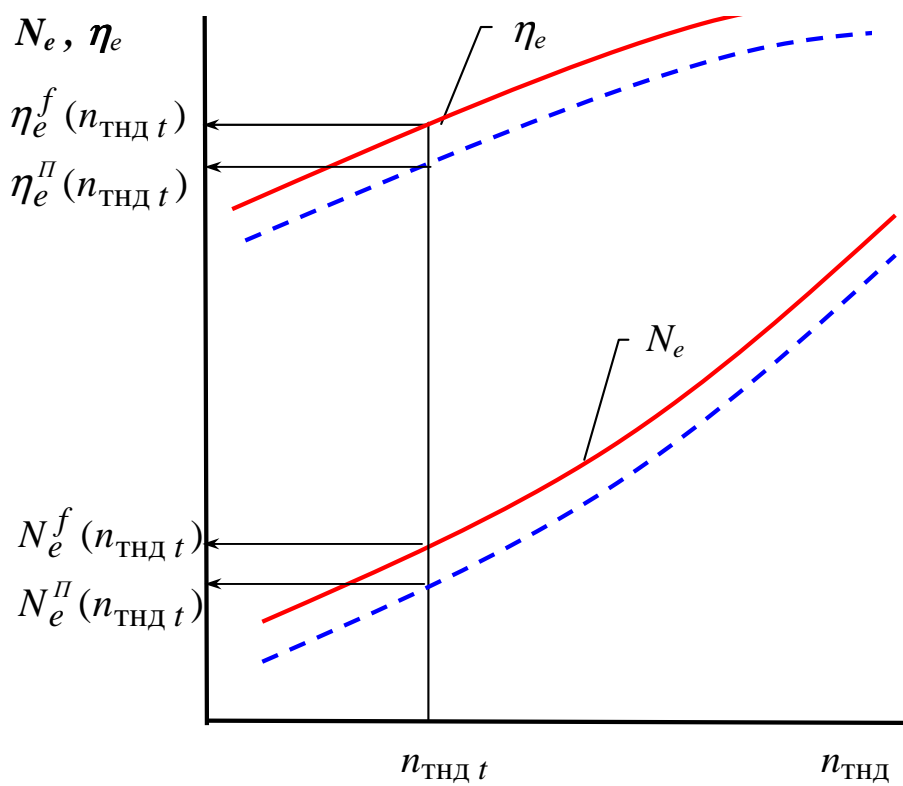


Рис.5.2 – Паспортна і фактична дросельні характеристики ГТУ

Точність визначення КТС можна збільшити за рахунок звуження області зміни режимних параметрів  $Q_{ком}$  і  $n_{тнд}$  за результатами аналізу експлуатаційних режимів ВЦН і ГТУ.

Відповідно до запропонованого методу, як ілюстрації, розраховані середньозважені КТС по ГПА №№ 1 ÷ 7 КС 1 с ВЦН 655P2 КЛАРК по одному з УМГ (табл.5.1).

З даних таблиці випливає, що найменші середньозважені значення КТС ВЦН за ККД має ГПА № 7. При інших однакових умовах даний агрегат доцільно поставити першим у чергу для проведення ремонту проточної частини ВЦН.

Таблиця 5.1 – Результати розрахунку середньозважених КТС ВЦН 655P2 КЛАРК ГПА КС 1 по одному з УМГ

№ ГПА	Наробітка ВЦН, год	Наробітка ГТУ, год	Середньозважений КТС ВЦН за потужністю	Середньозважений КТС ВЦН за ККД	Дата початку вимірів	Дата закінчення вимірів
01	108664	108664	1,063	0,982	09.09.1998 12:00	26.07.2002 12:00
02	110261	110261	1,069	0,954	09.09.1998 12:00	31.10.2002 12:00
03	100955	100955	1,074	0,942	09.09.1998 12:00	31.10.2002 12:00
04	102262	102262	1,095	0,934	08.01.2000 12:00	31.10.2002 12:00
05	108425	108425	1,022	0,993	21.12.1998 12:00	27.10.2002 12:00
06	111108	111108	1,079	0,939	09.09.1998 12:00	31.10.2002 12:00
07	101631	101631	1,124	0,912	09.09.1998 12:00	31.10.2002 12:00

Відмінними рисами розроблених методів є:

- відсутність допущення про характер зсуву фактичних характеристик щодо паспортних;

- відсутність необхідності використання експериментальних даних щодо характеру зсуву фактичних характеристик для кожного типу ГПА;
- універсальність методу, що дозволяє розраховувати КТС для всіх типів ВЦН, що знаходяться в експлуатації в ДК "Укртрансгаз";
- використання штатних засобів вимірів параметрів ГПА без проведення дорогих теплотехнічних випробувань;
- необхідна періодичність визначення КТС для рішення безперервних задач керування транспортом газу.

Задача визначення фактичних характеристик ВЦН і ГТУ після проведення ремонту відрізняється від аналогічної задачі, розв'язуваної безупинно в процесі експлуатації тим, що статистичний аналіз першої відсутній. ФТС ВЦН і ГТУ оцінюють за одиничними вимірами, що накладає особливі вимоги на якість виміру параметрів ГПА.

Визначення області припустимих режимів (ОПР) роботи ГПА і розрахунок запасу щодо помпажу вирішується на основі обчислених фактичних характеристик ВЦН і ГТУ. При визначенні області припустимих режимів враховують всі технологічні обмеження на експлуатацію даного типу ВЦН і ГТУ.

Для кожного ГПА в КЦ через певний інтервал часу розраховується ОДР і положення фактичної точки режиму роботи ГПА. За співвідношенням положення ОПР і фактичної точки режиму роботи визначають величину запасу по помпажу.

Область припустимих режимів ВЦН будують в координатах: зведена міра стиснення - зведена об'ємна продуктивність і політропний ККД - зведена об'ємна продуктивність.

Область припустимих режимів ГТУ будують в координатах: ефективна потужність ГТУ - обороти силової турбіни і ефективний ККД - обороти силової турбіни.

При зниженні значення коефіцієнта запасу за помпажем нижче граничних значень формують відповідні попереджувальні або аварійні повідомлення.

Задача визначення істотних змін режимних параметрів ГПА вирішується на основі фактичних характеристик ВЦН і ГТУ і їх поточних режимних параметрів. У випадку перевищення за модулем величини зміни одного або

декількох режимних параметрів (ККД, міра стиснення, потужність) за заданий інтервал контролю відповідних граничних значень, формуються попереджувальні повідомлення про істотну зміну параметра, за яким відзначене перевищення.

Важливою задачею, що розв'язується в рамках моніторингу ГПА в частині обліку, нормування паливно-енергетичних ресурсів і енергозбереження на рівні КС є розрахунок норми витрат паливного газу за фактичним ФТС [27]. Порівняльний аналіз фактичних витрат паливного газу з розрахованими за нормами дозволяє оперативно усувати можливі перевитрати паливного газу.

Ще однією із задач енергозбереження є оптимізація роботи КЦ на основі фактичного ФТС ГПА.

Підсистема функціональної діагностики САК КЦ КС "Ужгородська" вирішує три комплекси задач:

- розрахункові задачі функціональної діагностики;
- задачі відображення і формування попереджувальних і аварійних повідомлень;
- задачі архівування вхідної і діагностичної інформації.

#### **Комплекс розрахункових задач функціональної діагностики**

Опис розрахункових задач наведено в попередньому розділі.

У даний комплекс також входять задачі:

- обробки, аналізу вірогідності і відновлення вхідної інформації;
- оцінки стаціонарності режиму ГПА;
- імітації первинних вимірів параметрів роботи ГПА у складі КЦ.

#### **Комплекс задач відображення і формування попереджувальних і аварійних повідомлень**

Вхідна і діагностична інформація, що містить результати оцінки ФТС ВЦН і ГТУ ГПА, попереджувальні й аварійні повідомлення відображаються в наступних вікнах:

- "Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА: параметри ВЦН";
- "Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА: параметри ГТУ";
- "Розрахунок параметрів ВЦН";
- "Розрахунок параметрів ГТУ".

У вікні "Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА: параметри ВЦН" представлені вхідна і розрахункова інформація по ВЦН (рис.5.3) в наступному обсязі:

- тиск газу на вході ВЦН ( $P_{вх}$ ),  $кгс/см^2$ ;
- тиск газу на виході ВЦН ( $P_{вих}$ ),  $кгс/см^2$ ;
- температура газу на вході ВЦН,  $^{\circ}C$ ;
- температура газу на виході ВЦН,  $^{\circ}C$ ;
- частота обертання ротора ВЦН (або силової турбіни),  $об/хв$ .
- міра стиснення;
- політронний ККД;
- внутрішня потужність ВЦН,  $кВт$ ;
- зведена об'ємна продуктивність ВЦН,  $м^3/хв$ .

Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА на основі функціонального діагностування												Розробник - НДЦ Діагностування НДПАСУ"Трансгаз"											
Функції			параметри ВЦН																				
ГПА до помпашу		ОДР	Стає-ність			→ ГТУ																	
1			Рвх кгс/см2	36.00	Твх оС	18.10	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.38	ККД пол	82.86												
55,9 %			Рвих	50.10	Твих	56.30	7800	Ni[кВт]	4915.14	Qоб м3/хв	196.44												
2			Рвх кгс/см2	35.90	Твх оС	18.00	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.38	ККД пол	82.81												
56,0 %			Рвих	50.00	Твих	56.60	7805	Ni[кВт]	4915.83	Qоб м3/хв	196.27												
3			Рвх кгс/см2	36.10	Твх оС	18.00	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.38	ККД пол	82.82												
56,1 %			Рвих	50.20	Твих	56.10	7790	Ni[кВт]	4910.70	Qоб м3/хв	196.23												
4			Рвх кгс/см2	36.20	Твх оС	17.90	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.37	ККД пол	82.71												
58,4 %			Рвих	50.10	Твих	56.10	7803	Ni[кВт]	4956.09	Qоб м3/хв	200.10												
5			Рвх кгс/см2	36.00	Твх оС	18.10	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.38	ККД пол	83.01												
55,6 %			Рвих	50.10	Твих	56.30	7802	Ni[кВт]	4917.62	Qоб м3/хв	196.89												
6			Рвх кгс/см2	36.00	Твх оС	18.10	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.38	ККД пол	82.84												
56,7 %			Рвих	50.00	Твих	56.20	7800	Ni[кВт]	4919.33	Qоб м3/хв	197.67												
7			Рвх кгс/см2	36.30	Твх оС	18.00	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.37	ККД пол	82.53												
58,9 %			Рвих	50.20	Твих	56.30	7800	Ni[кВт]	4960.94	Qоб м3/хв	199.94												
Целеві параметри																							
Міра стиснення				1.38		Середньохвостовий ККД ГПА				23.50		%		Комерційна витрата		76.4		млн. м3/доб					
Ефективна потужність ГТУ				35.01		МВт		Об'єм перекачаного газу (з початку доби):				13.402		тис. м3		Витрата паливного газу (загальн.)				8625.09		м3/ год	
Середній політрон. ККД				82.80		%		Об'ємна витрата				1383.54		м3/ хв		Середня витрата паливного газу				1232.16		м3/ год	
Середній ККД ГТУ				28.39		%																	
01.12.2005 14:04:11																							

Рис.5.3 – "Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА: параметри ВЦН"

У вікні "Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА, параметри ГТУ" представлені вхідна і розрахункова інформація щодо ГТУ (рис.5.4) у наступному обсязі:

- тиск повітря на вході в осьовий компресор (ОК),  $кгс/см^2$ ;
- тиск повітря на виході з ОК,  $кгс/см^2$ ;
- міра стиснення в ОК;

- температура продуктів згоряння за турбіною низького тиску (ТНТ), К;
- витрати паливного газу ГТУ, кг/год.

Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА на основі функціонального діагностування										Розробник - НДЦ Діагностування НДПАСУтрансгаз	
Функції		ГПА до помпажу	ОДР	Стац-ність	→ ВЦН		параметри ГТУ				
1			Рвх ВК, кгс/см2	1.03	Ерх ВК	9.78	ККД ГТУ, %	28.36			
55,9 %			Рвих ВК, кгс/см2	10.10	Твих ТНТ, К	836.00	Гтр, кг/ч	1230.09			
2			Рвх ВК, кгс/см2	1.03	Ерх ВК	9.58	ККД ГТУ, %	28.37			
56,0 %			Рвих ВК, кгс/см2	9.90	Твих ТНТ, К	831.00	Гтр, кг/ч	1230.34			
3			Рвх ВК, кгс/см2	1.03	Ерх ВК	9.87	ККД ГТУ, %	28.35			
56,1 %			Рвих ВК, кгс/см2	10.20	Твих ТНТ, К	834.00	Гтр, кг/ч	1229.22			
4			Рвх ВК, кгс/см2	1.03	Ерх ВК	9.68	ККД ГТУ, %	28.45			
58,4 %			Рвих ВК, кгс/см2	10.00	Твих ТНТ, К	833.00	Гтр, кг/ч	1236.70			
5			Рвх ВК, кгс/см2	1.03	Ерх ВК	9.78	ККД ГТУ, %	28.37			
55,6 %			Рвих ВК, кгс/см2	10.10	Твих ТНТ, К	831.00	Гтр, кг/ч	1230.35			
6			Рвх ВК, кгс/см2	1.03	Ерх ВК	9.58	ККД ГТУ, %	28.37			
56,7 %			Рвих ВК, кгс/см2	9.90	Твих ТНТ, К	832.00	Гтр, кг/ч	1230.91			
7			Рвх ВК, кгс/см2	1.03	Ерх ВК	9.87	ККД ГТУ, %	28.46			
58,9 %			Рвих ВК, кгс/см2	10.20	Твих ТНТ, К	839.00	Гтр, кг/ч	1237.49			
Целеві параметри											
Міра стиснення		1.38		Середньоцеховий ККД ГПА		23.50		%	Комерційна витрата	76.4	млн. м3, доб
Ефективна потужність ГТУ		35.01 МВт		Об'єм перекачаного газу (з початку доби):		20.608		тис. м3	Витрата паливного газу (загальн.)	8625.09	н3/ год
Середній політроп. ККД		82.80 %		Об'ємна витрата		1383.54		н3/ хв	Середня витрата паливного газу	1232.16	н3/ год
Середній ККД ГТУ		28.39 %									
01.12.2005 14:09:21											

Рис. 5.4 – "Расчет параметров режима работы КЦ и ГПА: параметры ГТУ"

У приведених вікнах "Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА" (рис.5.3, 5.4) представлена узагальнена інформація про роботу КЦ: величина запасу до границь помпажу кожного ГПА, попереджувальна інформація про положення робочої точки режиму ГПА в області припустимих режимів і інформація про стаціонарність роботи ГПА.

Узагальнена інформація про роботу КЦ включає:

- дату, час відображення ФТС ГПА;
- міру стиснення газу ГПА КЦ;
- сумарну потужність ГПА КЦ, *МВт*;
- середній по КЦ політропний ККД ВЦН;
- середній по КЦ ККД ГТУ;
- середньоцеховий ККД ГПА;
- об'єм перекачаного газу від початку доби, *тис. м<sup>3</sup>*;
- сумарну об'ємну продуктивність ВЦН КЦ, *м<sup>3</sup>/хв*;
- сумарну комерційну продуктивність ВЦН КЦ, *млн.м<sup>3</sup>/доб*;



- сумарну витрату паливного газу ГТУ,  $\text{м}^3/\text{год}$ ;
- середні витрати паливного газу ГТУ КЦ,  $\text{м}^3/\text{год}$ .

Детальна інформація про фактичний ФТС обраних ВЦН і ГТУ і їхні режимні параметри відображається відповідно у вікнах "Розрахунок параметрів ВЦН" (рис. .5) і "Розрахунок параметрів ГТУ" (рис 5.6).

У вікні "Розрахунок параметрів ВЦН" окрім вхідної інформації представлена наступна розрахункова інформація:

- паспортні та фактичні характеристики ВЦН: витратно-напірна, політропного ККД, зведена внутрішня потужність;
- положення робочої точки поточного режиму роботи ВЦН;
- область припустимих режимів роботи ГПА;
- додаткові режимні параметри: об'єм перекачаного газу від начала доби, запас до границі помпажу, комерційна продуктивність ВЦН.

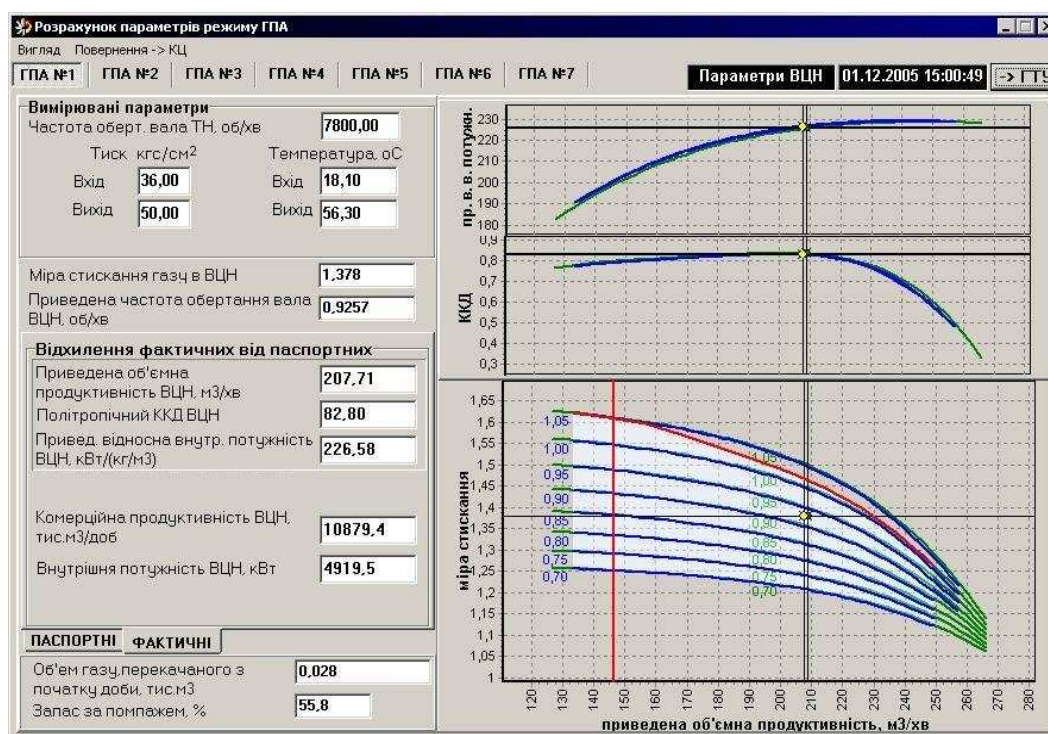


Рис. 5.5 – "Розрахунок параметрів ВЦН"

Область припустимих режимів роботи ВЦН розраховують з заданим періодом за фактичними зведеними характеристиками ВЦН і ГТУ. Область обмежується:

- лініями витратно-напірної характеристики при мінімально і максимально

припустимих частотах обертання ротора ВЦН;

- значеннями мінімальної і максимальної зведеної об'ємної продуктивності ВЦН;
- обмеженнями за потужністю ГТУ.

У вікні "Розрахунок параметрів ГТУ" (рис .6) крім вхідної інформації представлена наступна розрахункова інформація:

- паспортні і фактичні характеристики ККД ГТУ, а також витрати паливного газу у функції від потужності ГТУ;
- положення робочої точки поточного режиму роботи ГТУ;
- додаткові вхідні і режимні параметри: тиск і температура атмосферного повітря, частоти обертання роторів ТНД і КВД, витрати паливного газу, нижча теплотворна здатність палива, зведена потужність ГТУ.

Інформація щодо оцінки ФТС ГТУ виводиться на закладці "Діагностування" у наступному обсязі:

- коефіцієнти технічного стану ГТУ за потужністю, за ККД і за витратами паливного газу;
- відхилення фактичного значення потужності ГТУ від паспортного, кВт;
- відхилення фактичного значення ККД ГТУ від паспортного;
- відхилення фактичного значення витрат паливного газу ГТУ від паспортного,  $\text{нм}^3/\text{год}$ .

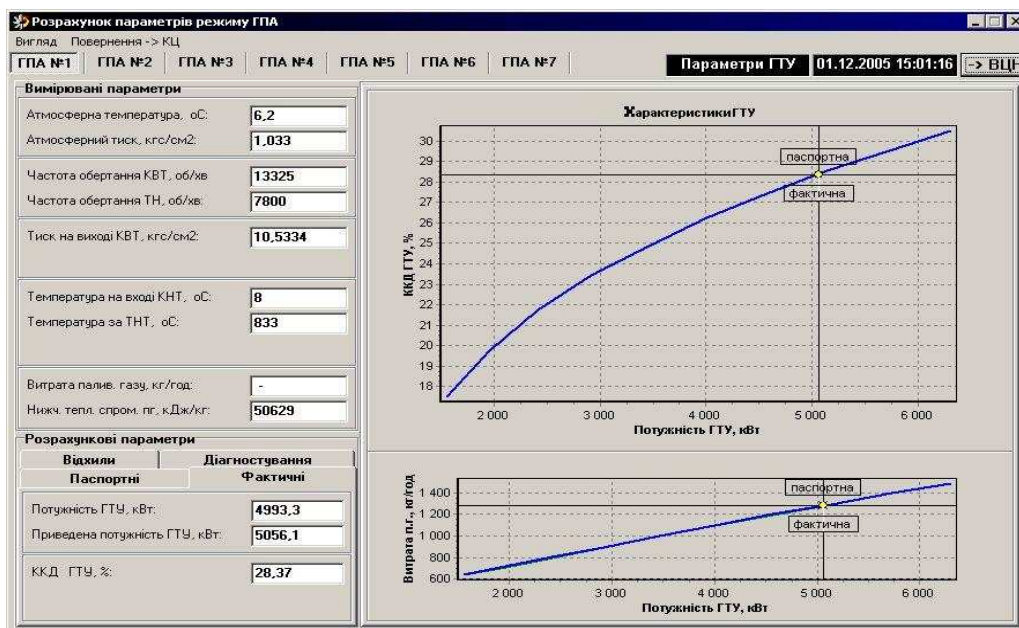


Рис. 5.6 – Розрахунок параметрів ГТУ

Параметри ВЦН, що відображуються при зупинці ГПА представлені відповідно на рис.5.7 і 5.8.

Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА на основі функціонального діагностування // Розробник - НДЦ Діагностування НДПАСУтрансгаз									
ГПА до помпажу	ОДР	Станція	параметри ВЦН						
1			Rвх кгс/см2	Tвх оС	Об. (1/хв) ВЦН	eps	ККД пол		
0			Rвих	Tвих		Ni[кВт]	Qоб м3/хв		
2			Rвх кгс/см2	Tвх оС	Об. (1/хв) ВЦН	eps	ККД пол		
56,0 %			Rвих	Tвих		Ni[кВт]	Qоб м3/хв		
3			Rвх кгс/см2	Tвх оС	Об. (1/хв) ВЦН	eps	ККД пол		
56,1 %			Rвих	Tвих		Ni[кВт]	Qоб м3/хв		
4			Rвх кгс/см2	Tвх оС	Об. (1/хв) ВЦН	eps	ККД пол		
58,4 %			Rвих	Tвих		Ni[кВт]	Qоб м3/хв		
5			Rвх кгс/см2	Tвх оС	Об. (1/хв) ВЦН	eps	ККД пол		
55,6 %			Rвих	Tвих		Ni[кВт]	Qоб м3/хв		
6			Rвх кгс/см2	Tвх оС	Об. (1/хв) ВЦН	eps	ККД пол		
56,7 %			Rвих	Tвих		Ni[кВт]	Qоб м3/хв		
7			Rвх кгс/см2	Tвх оС	Об. (1/хв) ВЦН	eps	ККД пол		
55,5 %			Rвих	Tвих		Ni[кВт]	Qоб м3/хв		
Цехові параметри			Міра стиснення	Середньохвостовий ККД ГПА	Об'єм перекачаного газу (з початку доби):	Комерційна витрата	Витрата паливного газу (загальн.)	Середня витрата паливного газу	
			1,38	23,47 %	48,775 тис. м3	65,2 млн. м3/доб	7549,38 м3/год	1258,23 м3/год	
			Ефективна потужність ГТУ	МВт	Об'ємна витрата				
			29,83		1180,16 м3/хв				
			Середній політроп. ККД	%					
			82,83						
			Середній ККД ГТУ	%					
			28,33						

Рис. 5.7 – Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА: параметри ВЦН – зупинка ГПА № 1

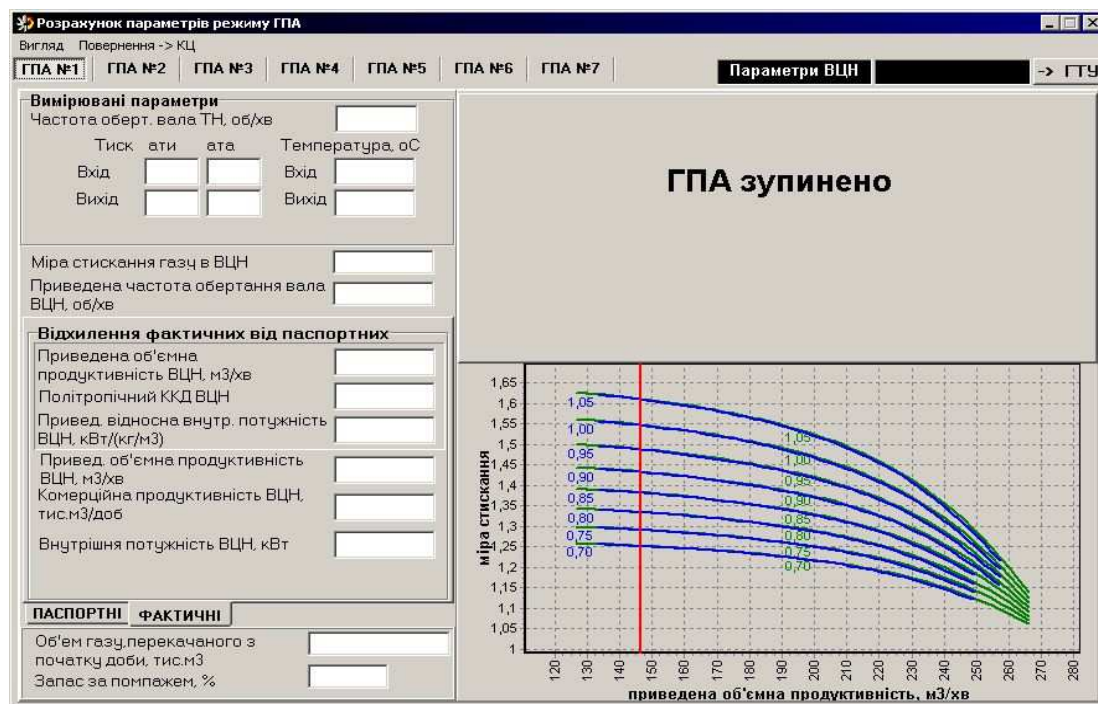


Рис. 5.8 – Розрахунок параметрів ВЦН – зупинка ГПА № 1



У режимі реального часу підсистема забезпечує контроль положення робочої точки режиму ГПА в області припустимих режимів і контролює вірогідність вимірів температури і тиску газу на вході і виході кожного ВЦН.

Попереджувальні повідомлення формуються у випадку, якщо запас за pompaжем ВЦН зменшився нижче граничного значення, яке задає оператор компресорного цеху (рис.5.9, 5.10). Аварійні повідомлення формуються у випадку, якщо запас за pompaжем стає нульовим (рис 5.11). Попереджувальне й аварійне повідомлення супроводжуються звуковим сигналом.

Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА на основі функціонального діагностування // Розробник - НДЦ Діагностування НДПАСУтрансгаз									
ГПА до pompaжу		ОДР	Станція	параметри ГТУ					
1	6,4 %			Рвх ВК, кгс/см <sup>2</sup>	1.03	Ерх ВК	9.68	ККД ГТУ, %	14.73
				Рвих ВК, кгс/см <sup>2</sup>	10.00	Твих ТНТ, К	833.00	Гтг, кг/ч	1502.89
2	57,0 %			Рвх ВК, кгс/см <sup>2</sup>	1.03	Ерх ВК	9.68	ККД ГТУ, %	28.37
				Рвих ВК, кгс/см <sup>2</sup>	10.00	Твих ТНТ, К	833.00	Гтг, кг/ч	1201.08
3	56,9 %			Рвх ВК, кгс/см <sup>2</sup>	1.03	Ерх ВК	9.68	ККД ГТУ, %	28.37
				Рвих ВК, кгс/см <sup>2</sup>	10.00	Твих ТНТ, К	833.00	Гтг, кг/ч	1201.03
4	56,6 %			Рвх ВК, кгс/см <sup>2</sup>	1.03	Ерх ВК	9.68	ККД ГТУ, %	28.37
				Рвих ВК, кгс/см <sup>2</sup>	10.00	Твих ТНТ, К	833.00	Гтг, кг/ч	1200.90
5	56,4 %			Рвх ВК, кгс/см <sup>2</sup>	1.03	Ерх ВК	9.68	ККД ГТУ, %	28.37
				Рвих ВК, кгс/см <sup>2</sup>	10.00	Твих ТНТ, К	833.00	Гтг, кг/ч	1200.75
6	56,7 %			Рвх ВК, кгс/см <sup>2</sup>	1.03	Ерх ВК	9.68	ККД ГТУ, %	28.37
				Рвих ВК, кгс/см <sup>2</sup>	10.00	Твих ТНТ, К	833.00	Гтг, кг/ч	1200.93
7	57,0 %			Рвх ВК, кгс/см <sup>2</sup>	1.03	Ерх ВК	9.68	ККД ГТУ, %	28.37
				Рвих ВК, кгс/см <sup>2</sup>	10.00	Твих ТНТ, К	833.00	Гтг, кг/ч	1201.13
Цілеві параметри				Міра стиснення	1.38	Середньозважений ККД ГПА	21.79	%	
Ефективна потужність ГТУ				33.20	МВт	Об'єм перекачаного газу (з початку доби):	13.492	тис. м <sup>3</sup>	Комерційна витрата
Середній політроп. ККД				82.17	%	Об'ємна витрата	1307.11	м <sup>3</sup> /хв	72 млн. м <sup>3</sup> /доб
Середній ККД ГТУ				26.42	%				Витрата паливного газу (загальн.)
									8708.71 м <sup>3</sup> /год
									Середня витрата паливного газу
									1244.10 м <sup>3</sup> /год

Рис.5.9 – Попереджувальне повідомлення про наближення ГПА № 1 до границі pompaжу у вікні "Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА"

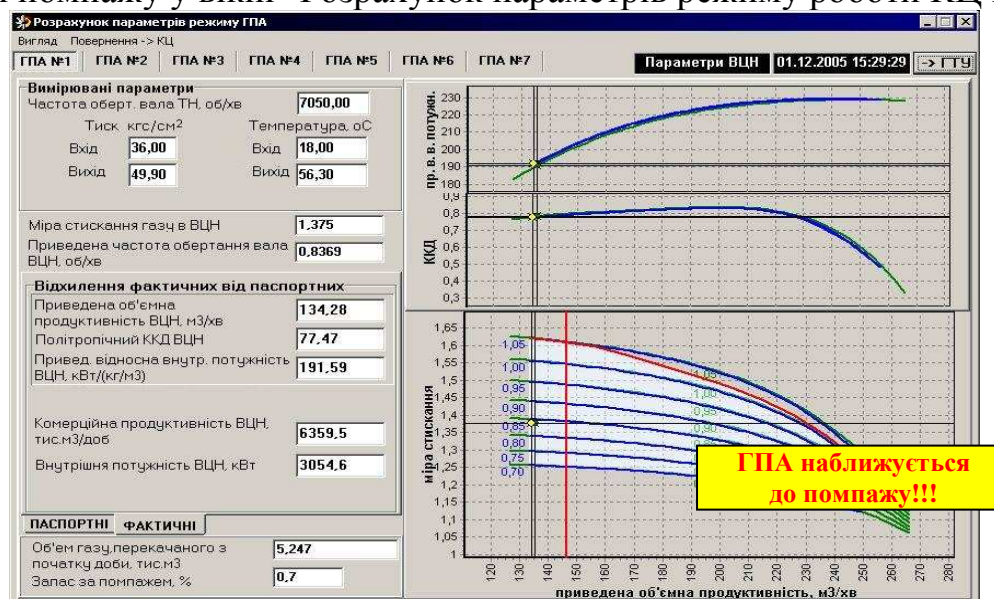


Рис. 5.10 – Попереджувальне повідомлення про наближення ГПА № 1 до границі pompaжу у вікні "Розрахунок параметрів ВЦН"

Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА на основі функціонального діагностування // Розробник - НДЦ Діагностування НДПАСУТрансгаз

Функції

ГПА до pompaju

ОДР

Стан-ність

→ ГТУ

параметри ВЦН

1			Rвх кгс/см2	36.00	Твх оС	18.00	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.38	ККД пол	0.00
0.0 %			Rвих	49.90	Твих	56.30	7000	Ni[kBт]	0.00	Qоб м3/хв	0.00
2			Rвх кгс/см2	36.10	Твх оС	17.90	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.38	ККД пол	82.70
57.4 %			Rвих	50.10	Твих	56.20	7800	Ni[kBт]	4936.49	Qоб м3/хв	198.07
3			Rвх кгс/см2	36.40	Твх оС	18.20	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.37	ККД пол	82.59
58.7 %			Rвих	50.30	Твих	56.30	7790	Ni[kBт]	4948.17	Qоб м3/хв	199.65
4			Rвх кгс/см2	36.20	Твх оС	18.10	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.37	ККД пол	82.49
59.9 %			Rвих	49.90	Твих	56.10	7805	Ni[kBт]	4962.05	Qоб м3/хв	202.17
5			Rвх кгс/см2	35.90	Твх оС	18.30	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.38	ККД пол	83.09
54.2 %			Rвих	50.10	Твих	56.30	7802	Ni[kBт]	4895.87	Qоб м3/хв	195.07
6			Rвх кгс/см2	36.00	Твх оС	18.10	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.36	ККД пол	82.13
61.8 %			Rвих	49.40	Твих	56.20	7810	Ni[kBт]	4960.46	Qоб м3/хв	204.62
7			Rвх кгс/см2	36.10	Твх оС	18.00	Об. (1/хв) ВЦН	eps	1.38	ККД пол	82.80
55.7 %			Rвих	50.30	Твих	56.20	7803	Ni[kBт]	4931.67	Qоб м3/хв	195.90

Целеві параметри

Міра стискання	1.37	Середньохвостовий ККД ГПА	20.12	%	Комерційна витрата	66.1	млн. м3/доб	
Ефективна потужність ГТУ	35.27	МВт	Об'єм перекачаного газу (з початку доби):	32.252	тыс. м3	Витрата паливного газу (загальн.)	8457.09	м3/год
Середній політрон. ККД	70.83	%	Об'ємна витрата	1195.48	м3/хв	Середня витрата паливного газу	1208.16	м3/год
Середній ККД ГТУ	28.46	%						

01.12.2005 15:27:55

Рис. 5.11 – Аварійне повідомлення при нульовому значенні запасу по pompaju ГПА № 1 у вікні "Розрахунок параметрів режиму роботи КЦ і ГПА"

### Комплекс задач архівування вхідної та діагностичної інформації

Підсистема архівування забезпечує збереження наступних видів інформації:

- архів параметрів технологічного процесу і стану ГПА (оперативні параметри і результати розрахунків з бази даних);
- архів повідомлень про роботу системи діагностування;
- архів дій оператора.

Дана підсистема функціональної діагностики САК КЦ КС "Ужгородська" здана в промислову експлуатацію в 2003 р. Аналогічна система функціонує в рамках САК КЦ КС "Тарутино" з 2002 р.

## 5.3. МОНІТОРИНГ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ НА РІВНЯХ УПРАВЛІННЯ МАГІСТРАЛЬНИМИ ГАЗОПРОВОДАМИ І ДК "УКРТРАНСГАЗ"

Основною задачею моніторингу ФТС ГПА на рівні УМГ і ДК "Укртрансгаз" є визначення фактичних характеристик, коефіцієнтів технічного

стану ВЦН ГТУ і режимних параметрів ГПА. Оцінки ФТС ГПА на рівні УМГ визначають за часовою інформацією (погодинною) від штатних засобів виміру, а на рівні ДК "Укртрансгаз" - за даними, що надходять від програмного комплексу "Експерт", який містить інформацію з диспетчерських журналів КС. Фактичні характеристики ВЦН і ГТУ, а також їхні коефіцієнти технічного стану визначають на основі методів обчислення узагальнених нормованих дефектів їхніх проточних частин (розділи 3 і 4).

Коефіцієнти технічного стану розраховують в наступному порядку.

Для обраних значень комерційної продуктивності  $\{Q_{ком t}\}$ , де  $\{Q_{ком t} = Q_{ком ном}, Q_{ком min}, Q_{ком max}\}$  обчислюють відповідні значення зведеної об'ємної продуктивності  $\{Q_{np t}\}$ .

Далі на основі розрахункових характеристик  $\varepsilon_{np c}^p(Q_{np}, D_c)$  і  $\eta_{пол c}^p(Q_{np}, D_c)$  для обчисленого значення узагальненого нормованого дефекту  $D_c$  і масиву значень  $\{Q_{np t}\}$  визначають масиви  $\{\varepsilon_{np}^p(Q_{np t})\}$  і  $\{\eta_{пол}^p(Q_{np t})\}$ . За паспортними характеристиками відповідно визначають масиви значень  $\{\varepsilon_{np}^{II}(Q_{np t})\}$  і  $\{\eta_{пол}^{II}(Q_{np t})\}$ .

Наступні операції складаються з встановлення величин внутрішньої потужності ВЦН  $N^p(Q_{np t})$  і  $N^{II}(Q_{np t})$  для кожної пари значень  $\{\varepsilon_{np}^p(Q_{np t}), \eta_{пол}^p(Q_{np t})\}$  і  $\{\varepsilon_{np}^{II}(Q_{np t}), \eta_{пол}^{II}(Q_{np t})\}$ .

КТС ВЦН визначають як:

$$K_{\eta}^{ВЦН}(Q_{ком t}) = \frac{\eta_{пол}^p(Q_{np t}, D_c)}{\eta_{пол}^{II}(Q_{np t})}, \quad (5.13)$$

$$K_N^{ВЦН}(Q_{ком t}) = \frac{N^p(Q_{np t}, D_c)}{N^{II}(Q_{np t})}. \quad (5.14)$$

Середньозважені КТС обчислюють за формулами (5.4, 5.5.)

Формульні залежності для визначення масиву  $\{Q_{np t}\}$  на основі масиву  $\{Q_{ком t}\}$  і параметрів зведення  $Z_{np}, R_{np}, T_{np}$  (з використанням яких одержані паспортні характеристики ВЦН), а також залежності для визначення масивів

значень внутрішньої потужності нагнітача  $\{N^p(Q_{np\ t})\}$  і  $\{N^II(Q_{np\ t})\}$  співпадають з відповідними залежностями, що наведені в розділі 3.

Значення  $\varepsilon_{np}^p(Q_{np\ t}, D_c)$  і  $\eta_{пол}^p(Q_{np\ t}, D_c)$  встановлюють засобом лінійної двохмірної інтерполяції розраховочних характеристик ВЦН за зведеною об'ємною продуктивністю  $Q_{np\ t}$  і узагальненому нормованому дефекту  $D_c$ . Відповідно значення  $\varepsilon_{np}^{II}(Q_{np\ t})$  і  $\eta_{пол}^{II}(Q_{np\ t})$  (тобто паспортні характеристики ВЦН) обчислюють методом лінійної інтерполяції паспортних характеристик тільки за  $Q_{np\ t}$ .

Норми витрат паливного газу на даних рівнях управління розраховують на основі узагальнених нормованих дефектів ВЦН і ГТУ. Для порівняльного аналізу роботи ГПА по різних КС і УМГ перевитрати паливного газу співвідносять з фактичним функціонально-технічним станом ГПА. На основі порівняльного аналізу визначають причини перевитрат паливного газу. Якщо для більшості КС або УМГ фіксуються перевитрати/економія паливного газу, то уточнюються норми витрат.

### **Аналіз оперативної вхідної інформації**

Як ілюстрація наданого вище розглянемо моніторинг ФТС ГПА одного з УМГ.

У рамках моніторингу ФТС УМГ виконано дослідження зміни КТС ВЦН і ГТУ за середньодобовими цеховими даними за період з 01.09.1999 по 31.01.2003 р. Проведено аналіз цехових даних, що надійшли, на повноту і коректність. Загальна кількість цехових даних, що надійшли, за зазначений період по УМГ склала 25870. У процентному відношенні до загальної кількості, дані, що повинні були надійти за зазначений період, склали величину порядку 69,7 %.

Аналіз вхідної інформації на коректність полягав у перевірці можливості виконання розрахунків параметрів ФТС ВЦН на основі методу, викладеного в розділі 3. У процентному відношенні кількість достовірних цехових даних, за якими були розраховані узагальнені нормовані дефекти до загальної кількості даних по УМГ, склала величину порядку 42,4 %. Відсоток наявності даних, що дозволяють визначити узагальнений нормований дефект, у загальному випадку, є мірою вірогідності визначувальних оцінок ФТС ГПА. Істотний відсоток (більше 20 %) цехових даних тих КС, по яких не пройшов розрахунок, є основою для видачі рекомендацій обслуговуючому персоналові КС про

необхідність перевірки з калібруванням каналів виміру параметрів агрегатної і цехової автоматики. При неможливості розрахувати узагальнений нормований дефект через невиконання обмежень за мірою стиснення видавалися рекомендації про необхідність перевірки каналів виміру тиску і частоти обертання ротора ВЦН. У випадку, якщо розрахунок неможливий через невиконання обмежень за ККД або за дефектом, то видавалися рекомендації про необхідність перевірки каналів виміру тиску і температури газу.

На рис. 5.12 наведені результати аналізу цехової інформації по КС 1 з ВЦН 655P2 КЛАРК з визначенням причин, за якими параметри ВЦН, що розраховувались, знаходились поза припустимими областями.

З рис. 5.12 випливає, що розрахунок ФТС проведений на 50 % загальної кількості середньодобових даних, що надійшли. Отримані результати аналізу дозволили з необхідною вірогідністю визначити ФТС ГПА цієї КС.

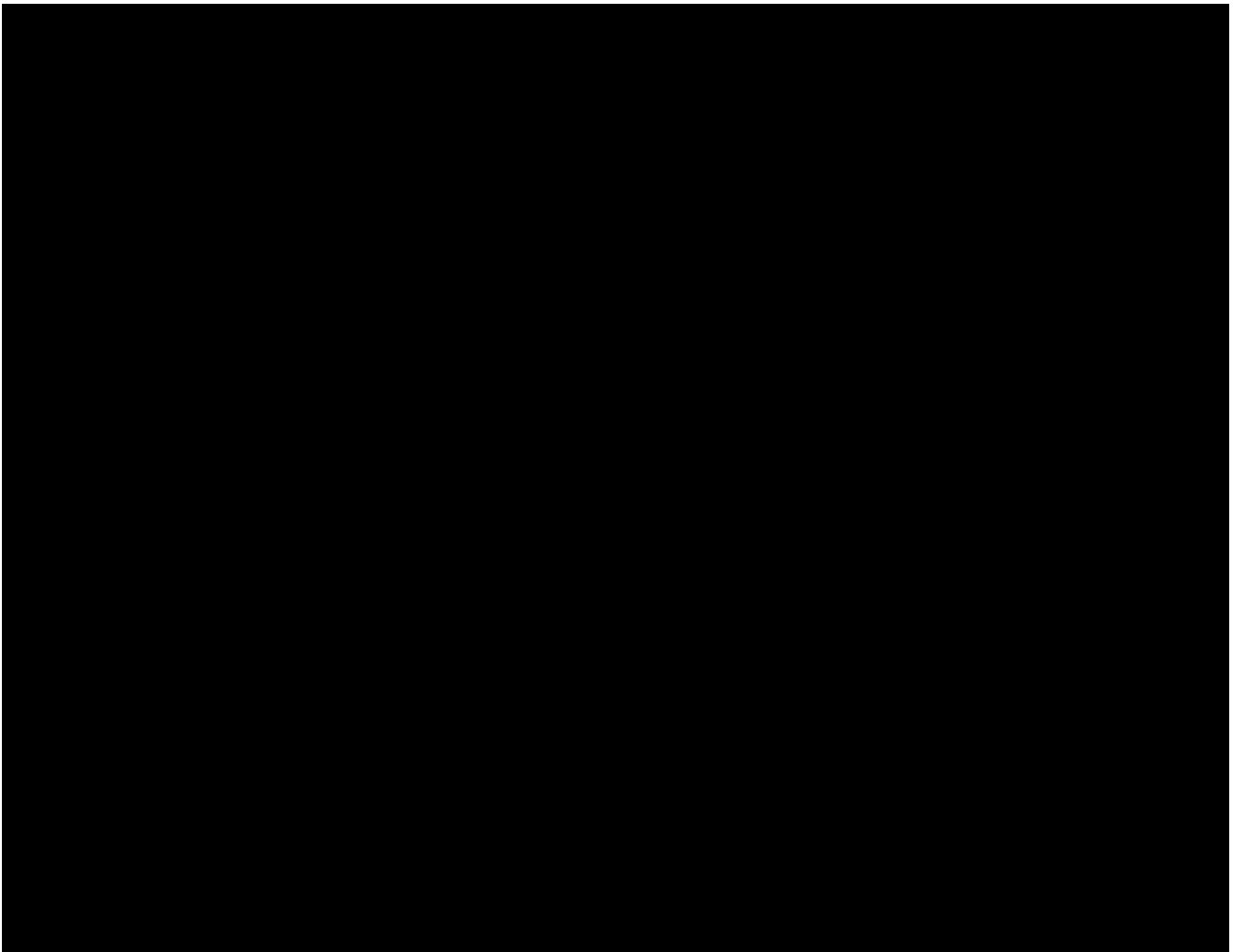


Рис. 5.12 – Оцінка якості оперативної інформації по КС 1 з ВЦН 655P2 КЛАРК



## Аналіз результатів визначення КТС ГПА

Наведені нижче результати містять середньозважені КТС ВЦН і ГТУ у функції часу наробітку за окремими КС, а також КТС ВЦН і ГТУ всіх експлуатованих в УМГ ГПА на 31.01.2003 року.

Середньозважені КТС ВЦН і ГТУ у функції часу оцінювалися по чотирьох КС УМГ:

- КС 1 із ВЦН 655P2 КЛАРК;
- КС 2 із ВЦН PCL-804-2;
- КС 3 із ВЦН PCL-804-2;
- КС 4 із ВЦН 655P2 КЛАРК.

Як ілюстрації на рис.5.14 наведені графіки зміни КТС ВЦН за потужністю для ГПА 1 КС 1, що розраховані за розробленим методом, а також графіки, розраховані методами [42] за результатами теплотехнічних випробувань.

На рис.5.14 окремими точками відображені значення КТС, що розраховані за результатами теплотехнічних випробувань, а суцільною— за розробленим методом на основі узагальненого нормованого дефекту.

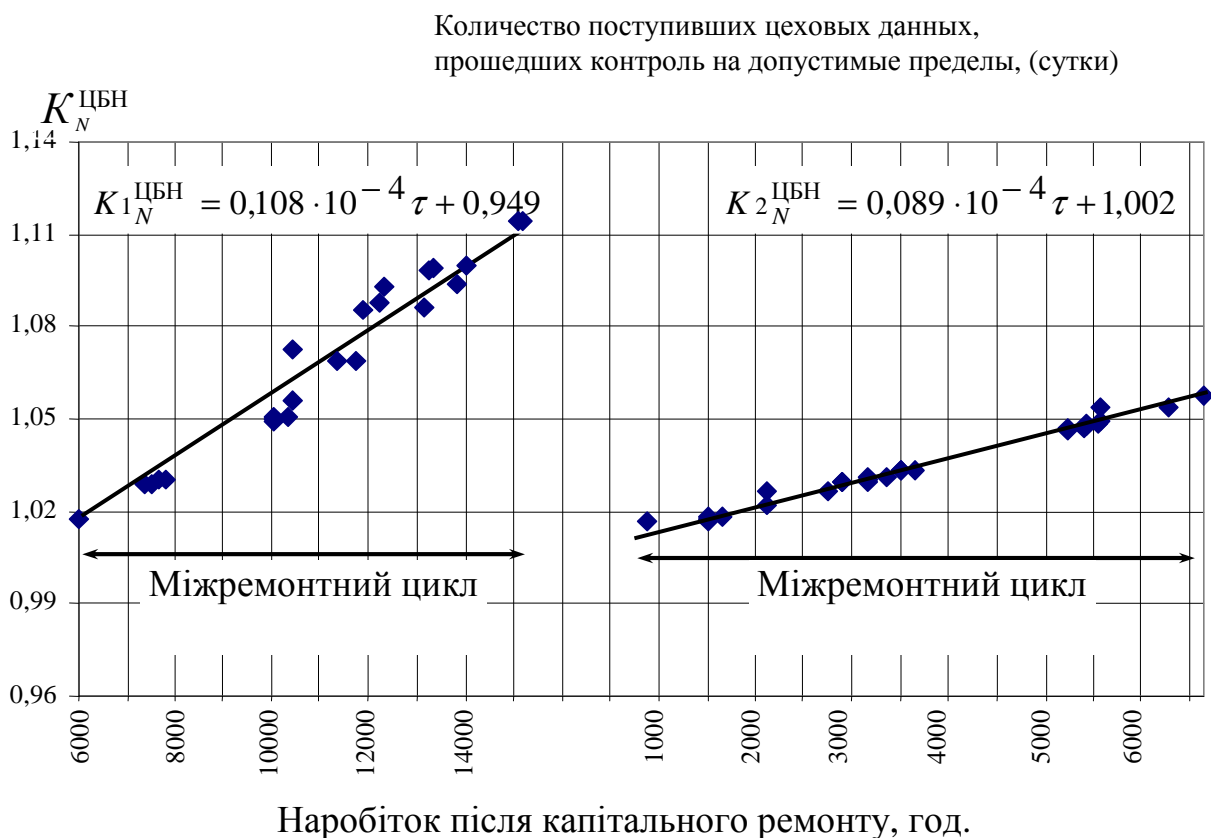


Рис. 5.14 – Зміна середньозваженого КТС ВЦН за потужністю ГПА № 1 КС 1 с ВЦН 655P2 КЛАРК в міжремонтний період

Функції зміни КТС від часу наробітки після капітального ремонту в годинах можуть бути подані в наступному вигляді:

$$K_{1_{N\text{cp}}}^{\text{ЦБН}} = 0,108 \cdot 10^{-4} \cdot t + 0,949 - \text{для першого меіремонтного циклу,}$$

$$K_{2_{N\text{cp}}}^{\text{ЦБН}} = 0,089 \cdot 10^{-4} \cdot t + 1,002 - \text{для другого міжремонтного циклу,}$$

$t$  – час нароботку (в годинах) від останнього капітального ремонту.

Для аналізу вірогідності отриманих результатів по розглянутому ГПА № 1 КС 1 із ВЦН 655Р2 КЛАРК були проведені теплотехнічні випробовування і відповідно до діючих методик визначені КТС. Результати порівняльного аналізу подані в табл.5.2.

Результати порівняння значень КТС, що були розраховані відповідно до розробленого методу зі значеннями результатів теплотехнічних випробувань, показали, що середнє значення відхилення не перевищило 4 %. При цьому значення КТС ГПА знижуються від ремонту до ремонту, що пояснюється наявністю необоротних процесів у вузлах ГПА.

Значення середньозважених КТС за типами ВЦН для одного з УМГ ДК "Укртрансгаз" наведені в табл.5.3.

Підсумкові результати визначення узагальнених нормованих середньоцехових дефектів ВЦН ГПА КС УМГ на 31.01.2003 р. наведені в табл.5.4. Інформація про зміни КТС в часі по кожному ГПА і підсумкова інформація про ФТС всіх експлуатуємих ГПА є основою для прийняття рішення про реновації енергообладнання, технічного обслуговування ГПА за "станом".

### **Моніторинг функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів на рівні ДК "Укртрансгаз"**

Моніторинг ФТС ГПА на рівні ДК "Укртрансгаз" проводиться на основі розробленого Атласу фактичних характеристик ВЦН парку експлуатованих ГПА ГТС. Даний Атлас створений і періодично оновлюється за допомогою розробленого програмного комплексу оцінки ФТС ВЦН ДК "Укртрансгаз" [5].

Таблиця 5.2 – Результати порівняння значень КТС ГПА № 1 КС 1 із ВЦН 655P2 КЛАРК

Інтервали міжремонтного циклу	КТС, що розраховані за фактичними характеристикам	КТС, що розраховані за теплотехнічними випробуваннями	Відносний відхил КТС, %
початок – кінець			
<b><i>КТС ВЦН за ККД</i></b>			
09.09.1998 – 21.03.2000	0,972	0,963	0,9
	0,965	0,947	1,9
23.08.2000 – 09.07.2002	0,994	0,983	1,1
	0,98	0,968	1,2
<b><i>КТС ВЦН за потужністю</i></b>			
09.09.1998 – 21.03.2000	1,016	1,05	3,3
	1,113	1,13	1,5
23.08.2000 – 09.07.2002	1,013	1,034	2,0
	1,058	1,097	3,6
<b><i>КТС ГТУ за ККД</i></b>			
09.09.1998 – 21.03.2000	0,981	0,958	2,4
	0,952	0,94	1,2
23.08.2000 – 09.07.2002	0,975	0,948	2,8
	0,936	0,924	1,2
<b><i>КТС ГТУ за потужністю</i></b>			
09.09.1998 – 21.03.2000	0,928	0,913	1,6
	0,989	0,876	1,5
23.08.2000 – 09.07.2002	0,926	0,905	2,3
	0,894	0,882	1,3
<b><i>КТС ГТУ за паливним газом</i></b>			
09.09.1998 – 21.03.2000	1,015	1,042	2,6
	1,04	1,053	1,2
23.08.2000 – 09.07.2002	1,013	1,027	1,3
	1,055	1,08	2,3

Таблиця 5.3 – Значення середньозважених КТС за типами ВЦН одного з УМГ ДК “Укртрансгаз”

Тип ВЦН	КТС ВЦН за ККД	КТС ВЦН за потужністю
H-650-21-1	0,953	1,021
H-650-21-2	0,951	1,057
RF-2BB-30/76 COOPER BESSEMER	0,949	1,022
H-235-21-1	0,947	1,025
655P2 КЛАРК	0,940	1,032
PCL-804-2/36	0,939	1,036
H-6-56	0,938	1,020

**Атлас фактичних характеристик відцентрових нагнітачів парку експлуатованих газоперекачувальних агрегатів газотранспортної системи**

Атлас фактичних характеристик ВЦН парку експлуатованих ГПА ГТС створений відповідно до описаного вище методу оцінки ФТС, що передбачає "розщеплення" середніх за цехом узагальнених дефектів на індивідуальні. Атлас також містить інформацію про значення узагальнених дефектів по кожному ВЦН.

При створенні Атласу використовували середньодобові дані диспетчерських журналів по всіх КС ДК "Укртрансгаз" за останні 5 років. У процесі визначення фактичних характеристик ВЦН аналізувалася вірогідність вхідної інформації з виконання обмежень режимних параметрів у частині: зведеної міри стиснення, політропного ККД і узагальненого дефекту. У випадку невиконання кожного з відзначених обмежень формувалися відповідні ознаки невірогідності. За результатами обробки масивів вхідної інформації визначалася річна і підсумкова статистика вірогідності. Ця статистика використовувалася, з одного боку, як оцінка міри вірогідності отриманих фактичних характеристик ВЦН, а з іншого, як основа для видачі рекомендацій обслуговуючому персоналу для перевірки каналів виміру цехових параметрів по тих КС, по яких відсоток недостовірної вхідної інформації перевищив задані межі.

Таблиця 5.4 – Узагальнені нормовані середньоцехові дефекти ВЦН ГПА КС УМГ

КС	Цех	Нагнітач	Дата початку оцінки ФТС	Дата кінця оцінки ФТС	Узагальнений нормований середньо-цеховий дефект ВЦН
1	2	3	4	5	6
Борова	1	RF-2BB-30/76	09.09.1998	31.01.2003	0,204
Борова	2	H-6-56	11.11.1998	01.04.2002	0,304
Первомайськ	1	RF-2BB-30/76	09.09.1998	31.01.2003	0,337
Машівка	1	RF-2BB-30/76	09.09.1998	31.01.2003	0,234
Кременчук	1	655P2 КЛАРК	09.09.1998	31.01.2003	0,649
Задніпровська	1	H-235-21-1	09.09.1998	31.01.2003	0,407
Олександрівка	1	655P2 КЛАРК	09.09.1998	31.01.2003	0,325
Кіровоград	1	H-235-21-1	10.11.1998	31.01.2003	0,404
Південно-Бузька	1	H-235-21-1	09.09.1998	31.01.2003	0,322
Тальне	1	655P2 КЛАРК	09.09.1998	31.01.2003	0,323
Гайсин	1	655P2 КЛАРК	09.09.1998	31.01.2003	0,417
Іллінці	1	PCL-804-2	09.09.1998	31.01.2003	0,394
Іллінці	2	H-235-21-1	09.09.1998	01.01.2003	0,230
Бар-1	1	655P2 КЛАРК	09.09.1998	31.01.2003	0,619
Бар-2	1	H-650-21-2	09.09.1998	31.01.2003	0,213
Бар-2	2	H-650-21-1	12.09.1998	12.12.2002	0,414
Гусятин-1	1	RF-2BB-30/76	09.09.1998	31.01.2003	0,423
Гусятин-2	1	PCL-804-2/36	09.09.1998	31.01.2003	0,489
Гусятин-2	2	H-235-21-1	09.09.1998	31.01.2003	0,203
Софіївка	1	PCL-804-2/36	09.09.1998	20.01.2003	0,276
Софіївка	2	H-650-21-2	09.09.1998	31.01.2003	0,270
Софіївка	3	H-650-21-2	09.09.1998	27.12.2002	0,218
Ставище	1	PCL-804-2	09.09.1998	31.01.2003	0,394

Наведені в Атласі фактичні характеристики ВЦН містять коефіцієнти апроксимації зведених витратно-напірних характеристик, характеристик політропного ККД і характеристик зведеної відносної внутрішньої потужності. Характеристики подані також у графічному виді. Крім того, в Атласі подані паспортні характеристики всіх типів ВЦН, перелічені з урахуванням теплофізичних властивостей реальних газів відповідно до ISO 5389:1992(E).

Як приклад графічного подання, на рис.5.15 ÷ 5.17 відображені паспортні і фактичні характеристики ВЦН ГПА № 1 КС 1 із ВЦН 655P2 КЛАРК УМГ. Пунктиром на рисунках відображені паспортні, а суцільною лінією – фактичні характеристики ВЦН.

Передбачено оновлення фактичних характеристик всього парку ГПА з інтервалом 1 раз в місяць.

На підставі отриманих фактичних характеристик розраховані КТС ВЦН ГПА за ККД і потужністю в функції від зведеної об'ємної продуктивності. Нижче на рис.5.18 і 5.19 наведені розраховані КТС для ГПА № 1 КС 2 з ВЦН PCL-804-2 УМГ.

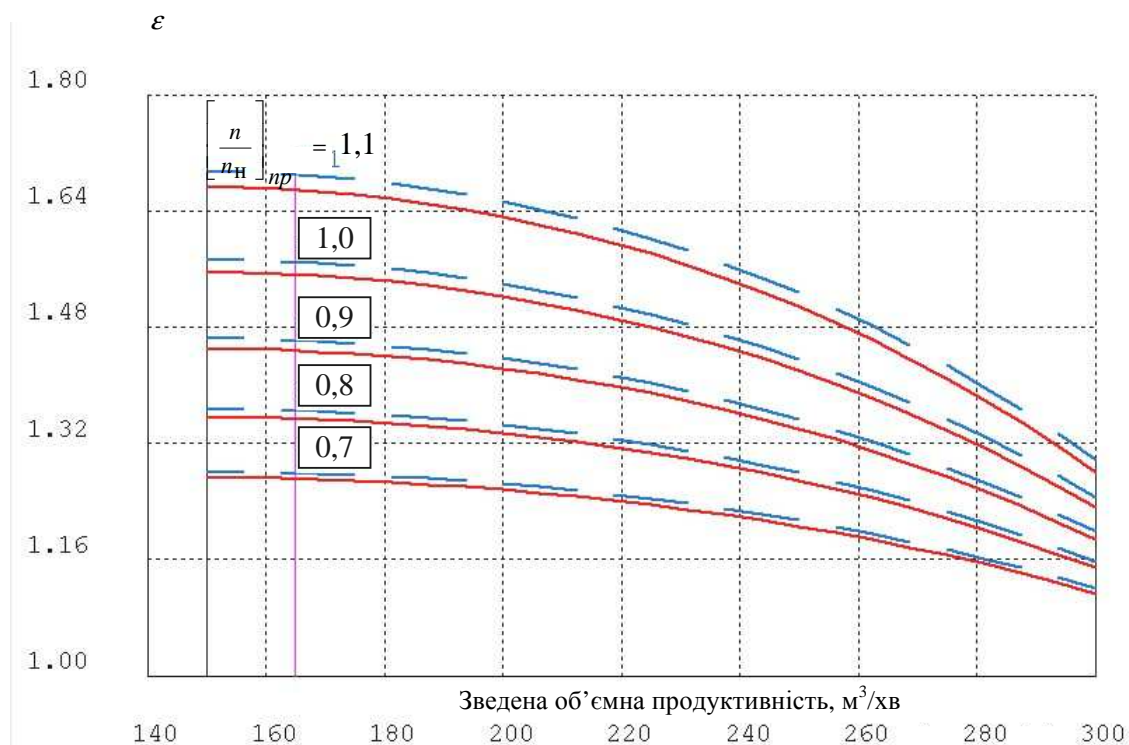


Рис. 5.15 – Витратно-напірна характеристика ВЦН 655P2 КЛАРК ГПА 1  
Цех 1 КС 1 УМГ

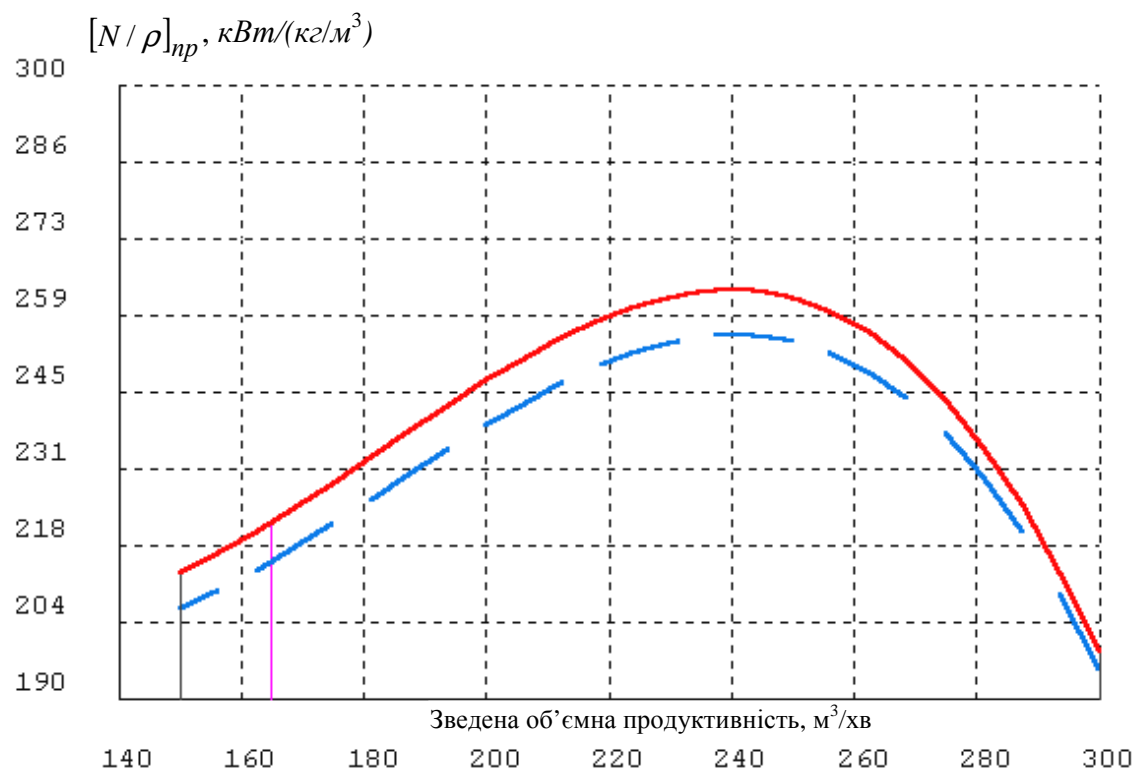


Рис. 5.16 – Потужнісна характеристика ВЦН 655Р2 КЛАРК ГПА 1 Цех 1 КС 1  
УМГ

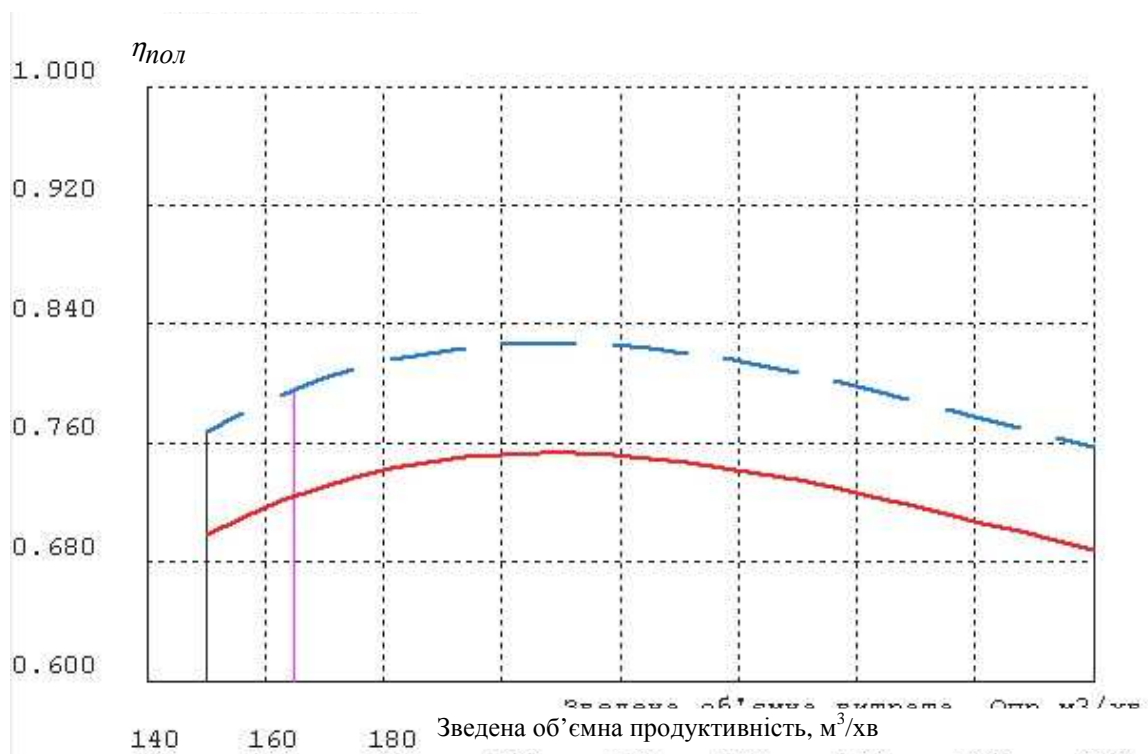


Рис. 5.17 – Характеристика політропного ККД ВЦН 655Р2 КЛАРК ГПА 1 Цех 1  
КС 1 УМГ

Як ілюстрації фрагментів Атласу в табл.5.5 і 5.6 наведені розраховані значення коефіцієнтів апроксимуючих поліномів фактичних характеристик і значення узагальнених дефектів ВЦН ГПА відповідно за період з 09.09.1998 по 31.10.2002 рік для КС 4 Цех 1.

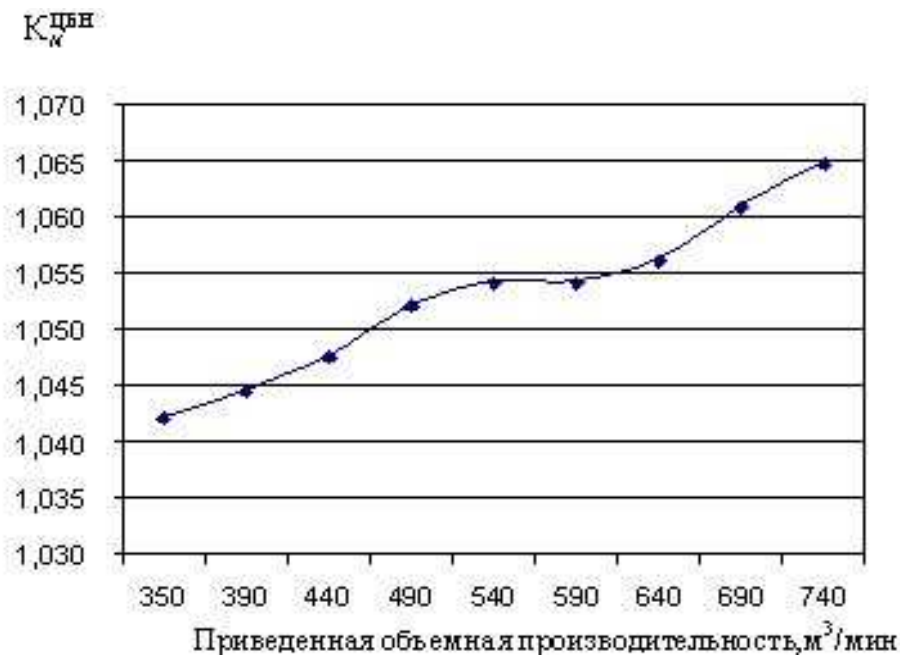


Рис. 5.18 – КТС ВЦН ГПА за потужністю у функції від  $Q_{пр}$  для ГПА 1 Цех 1 КС 2 із ВЦН PCL-804-2 УМГ

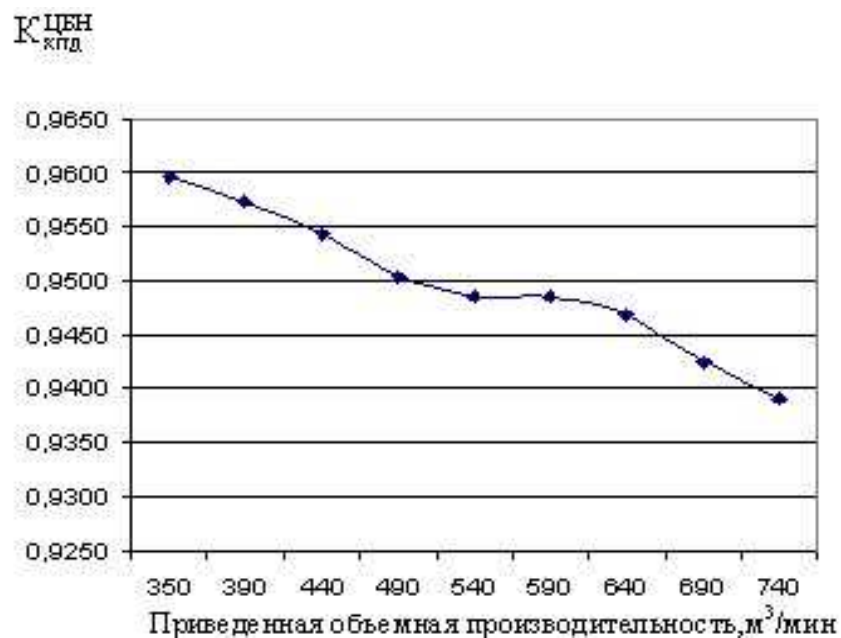


Рис. 5.19 – КТС ВЦН ГПА за ККД у функції від  $Q_{пр}$  для ГПА 1 Цех 1 КС 2 із ВЦН PCL-804-2 УМГ



### **Програмний комплекс моніторингу ГПА ДК "Укртрансгаз"**

Програмний комплекс моніторингу ГПА ДК "Укртрансгаз" включає програмне забезпечення розрахунку оцінки ФТС ВЦН і програмне забезпечення розрахунку оцінки ФТС ГТУ.

Нижче описано програмне забезпечення розрахунку оцінки ФТС ВЦН. Опис програмного забезпечення розрахунку оцінки ФТС ГТУ аналогічно опису розрахунку оцінки ФТС ВЦН.

Програмний комплекс вирішує наступні задачі оцінки ФТС ВЦН:

- ведення і корекція нормативно-довідкової інформації (НДІ) по кожному експлуатованому типу ВЦН;
- визначення фактичних зведених характеристик ВЦН із аналізом вірогідності вхідних даних;
- визначення режимних параметрів роботи ВЦН із дослідженням впливу зміни вимірюваних параметрів на результати оцінки ФТС;
- ведення статистичної бази даних фактичних зведених характеристик, коефіцієнтів технічного стану ВЦН, фактичного наробітку і проведених ремонтів ВЦН;
- створення паперової версії Атласу фактичних характеристик ВЦН ГПА, експлуатованих у ДК "Укртрансгаз".

Програмний комплекс має дворівневу структуру.

На верхньому рівні визначають наступну інформацію:

- конкретну розв'язувану задачу з перерахованих вище;
- ісходні дані для рішення задачі, у тому числі що включають УМГ, КС, КЦ, ГПА;
- вид вхідної інформації, на основі якої вирішується задача оцінки ФТС ВЦН;
- настроювання програмного забезпечення на роботу з базами даним інших програм.

На нижньому рівні вирішується конкретна задача, відображуються результати вирішення, проводиться контроль результатів, занесення їх до бази даних при позитивних результатах контролю.

Таблиця 5.5 – Коефіцієнти апроксимуючих поліномів фактичних характеристик ВЦН ГПА

№ ГПА	Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
	A	$B \cdot 10^3, (м^3/хв)^{-1}$	$C \cdot 10^6, (м^3/хв)^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1}, кВт \cdot м^3/кг$	$B1 \cdot 10, кВт \cdot м^3/кг \cdot (м^3/хв)^{-1}$	$B2 \cdot 10^3, (кВт \cdot м^3/кг) \cdot (м^3/хв)^{-2}$	$B3 \cdot 10^6, (кВт \cdot м^3/кг) \cdot (м^3/хв)^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3, (м^3/хв)^{-1}$	$D2 \cdot 10^6, (м^3/хв)^{-2}$	$D3 \cdot 10^9, (м^3/хв)^{-3}$
01	1,55735	11,81617	-39,7143	60,10530	-74,43146	44,68006	-81,07554	-0,32393	13,07734	-49,53356	58,070
02	1,56525	12,13739	-40,6583	55,30282	-68,13633	41,23970	-75,02518	-0,32370	13,59882	-51,26433	59,664
03	1,52965	11,96373	-40,0095	60,94832	-75,51578	45,40803	-82,53987	-0,30883	12,69553	-48,05665	56,266
04	1,56875	12,03445	-40,3924	56,31919	-69,41664	41,92698	-76,22518	-0,32376	13,50063	-51,04615	59,664
05	1,53684	12,02815	-40,2053	59,72833	-73,94584	44,42957	-80,65596	-0,32093	13,07734	-49,53356	58,070
06	1,56678	11,98120	-40,2183	57,32115	-70,74508	42,59684	-77,32868	-0,32191	13,41939	-50,84058	59,622
07	1,56637	12,02473	-40,3612	56,99910	-70,34589	42,39334	-76,98882	-0,30377	13,19247	-49,73288	57,860

Таблиця 5.6 – Розраховані узагальнені дефекти ВЦН ГПА

№ ГПА	Узагальнений дефект	Наробіток ВЦН, год	Наробіток ГТУ, год	Зсув витратно-напорної характеристики, %	Зсув характеристики політропного ККД, %
01	0,525	99126	99126	0,79	6,3
02	0,034	79812	79812	0,05	0,4
03	0,686	95563	95563	1,03	8,2
04	0,144	97817	97817	0,22	1,7
05	0,494	88608	88608	0,74	5,9
06	0,209	91122	91122	0,31	2,5
07	0,179	88175	88175	0,27	2,1

Програмний комплекс розрахунку фактичних характеристик ВЦН ГПА виконує свої функції за умови установки і запуску наступних програмних продуктів:

- запущений Microsoft SQL v 7.0;
- встановлений Net Framework v 1.1. або вище;
- встановлений Internet Explorer v 5.0 або вище;
- встановлений Windows 95,98,2000,XP.

Розроблений програмний комплекс складається з наступних компонент (складових частин):

- програми організації обчислень (atlas);
- компоненти розрахунку загальцехового дефекту (atldll);
- бази даних у середовищі MS SQL ;
- програми запису розрахункової інформації з ВЦН і ГТУ до бази даних (БД) “Експерт” (rasch\_gra).

Програма організації обчислень здійснює:

- експорт і імпорт даних між БД MS SQL і БД “Експерт”;
- розрахунок узагальнених дефектів і фактичних характеристик ВЦН ГПА;
- розрахунок режимних параметрів для кожного агрегату і для кожного цеху;
- графічне і табличне відображення отриманих результатів розрахунків.

Компонента розрахунку загальноцехового дефекту здійснює розрахунок значення узагальненого цехового дефекту і визначення його виду на кожному дати, що надійшла на розрахунок. Отримані результати компонента передає в програму організації обчислень.

БД у середовищі MS SQL здійснює збереження отриманих або експортованих результатів.

Програма rasch\_gra здійснює розрахунок режимних параметрів КЦ на основі таблиці tras.dbf (БД “Експерт”), а також розрахунок фактичної потужності і ККД ГТУ, з наступним занесенням отриманих результатів у таблицю tras.dbf.

Схема технологічного обміну компонент ПК наведена на рис. 5.20

Інформаційний обмін компонент ПК між собою представлено на рис.5.2 – 5.4. Цифра “1” означає, що даний обмін виконується разово, а буква “n” - багаторазово.

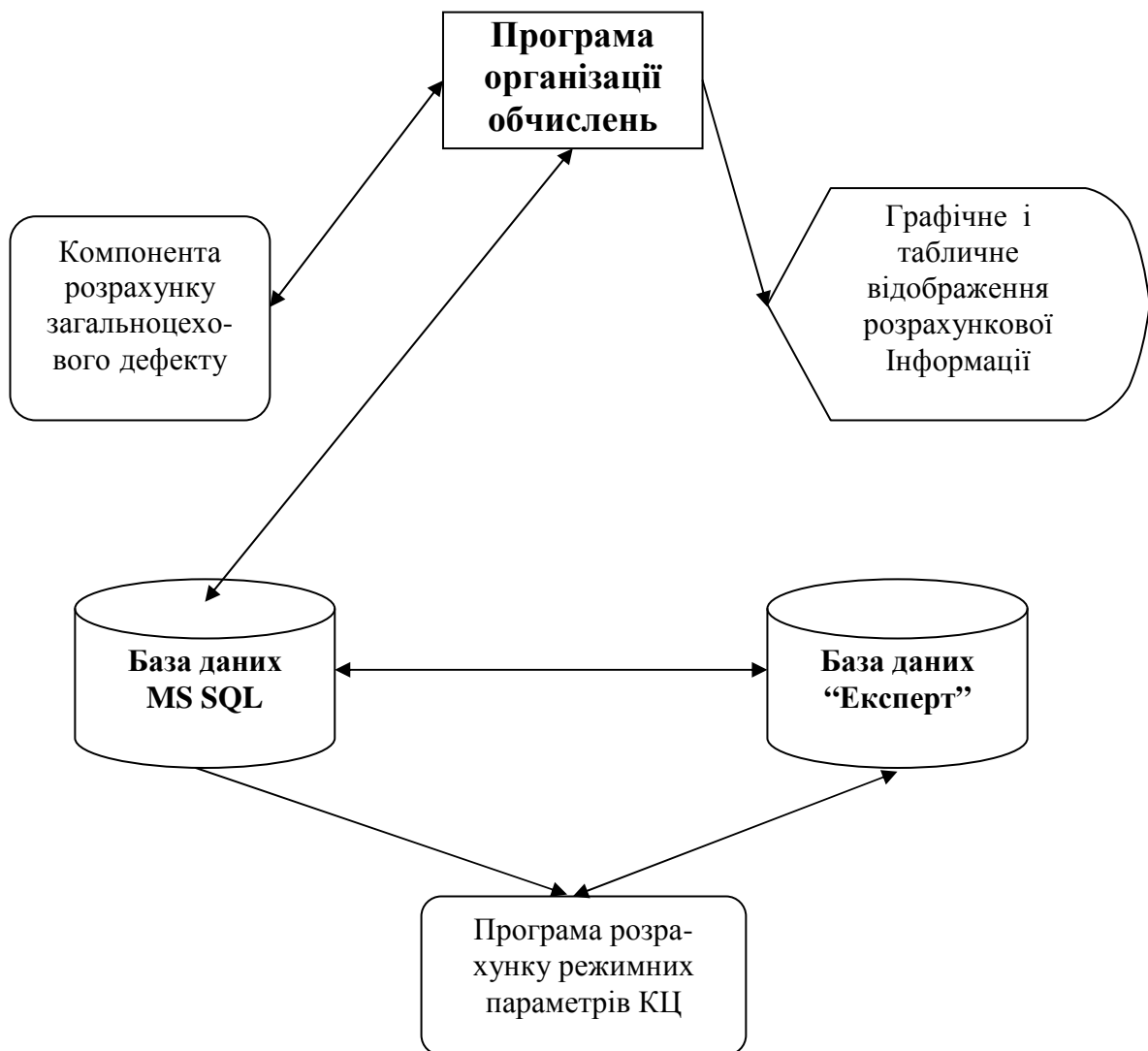


Рис. 5.21- Схема технологічного обміну компонент ПК

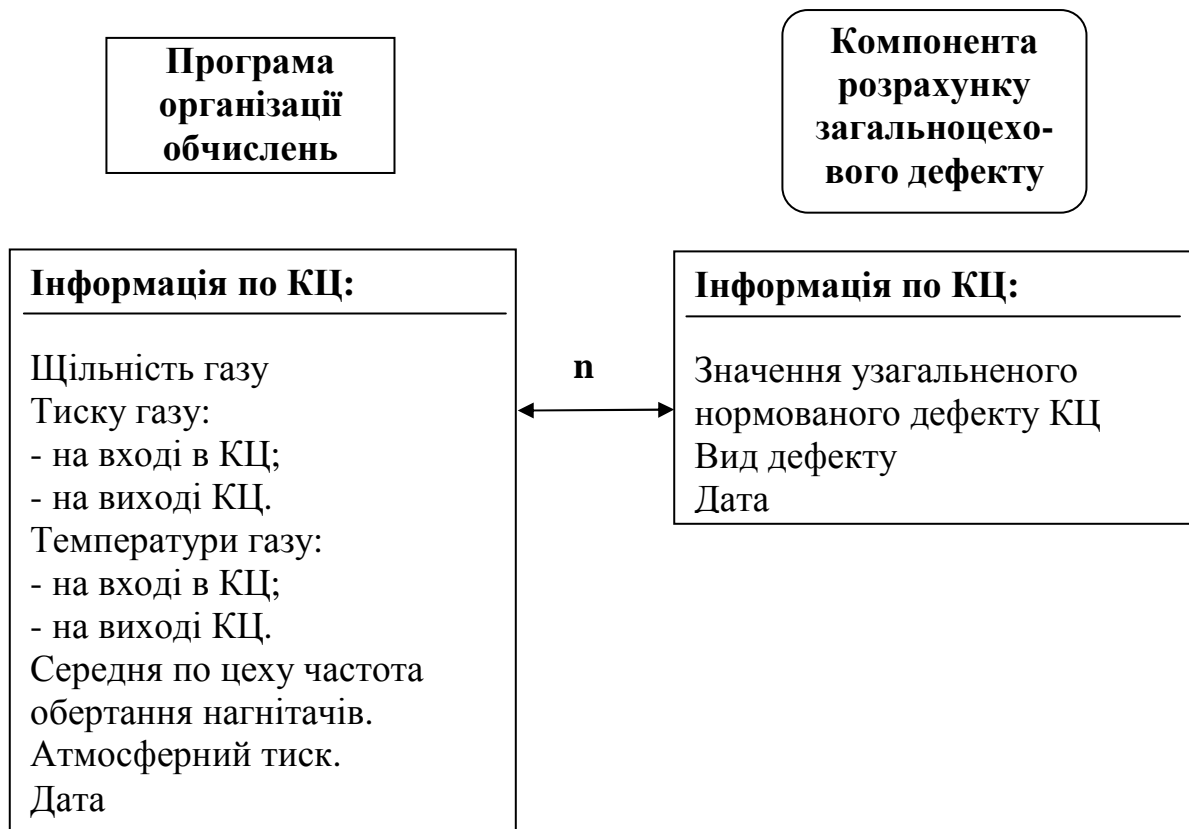


Рис. 5.22 - Інформаційний обмін між програмою організації обчислень і компонентою розрахунку загальноцехового дефекту

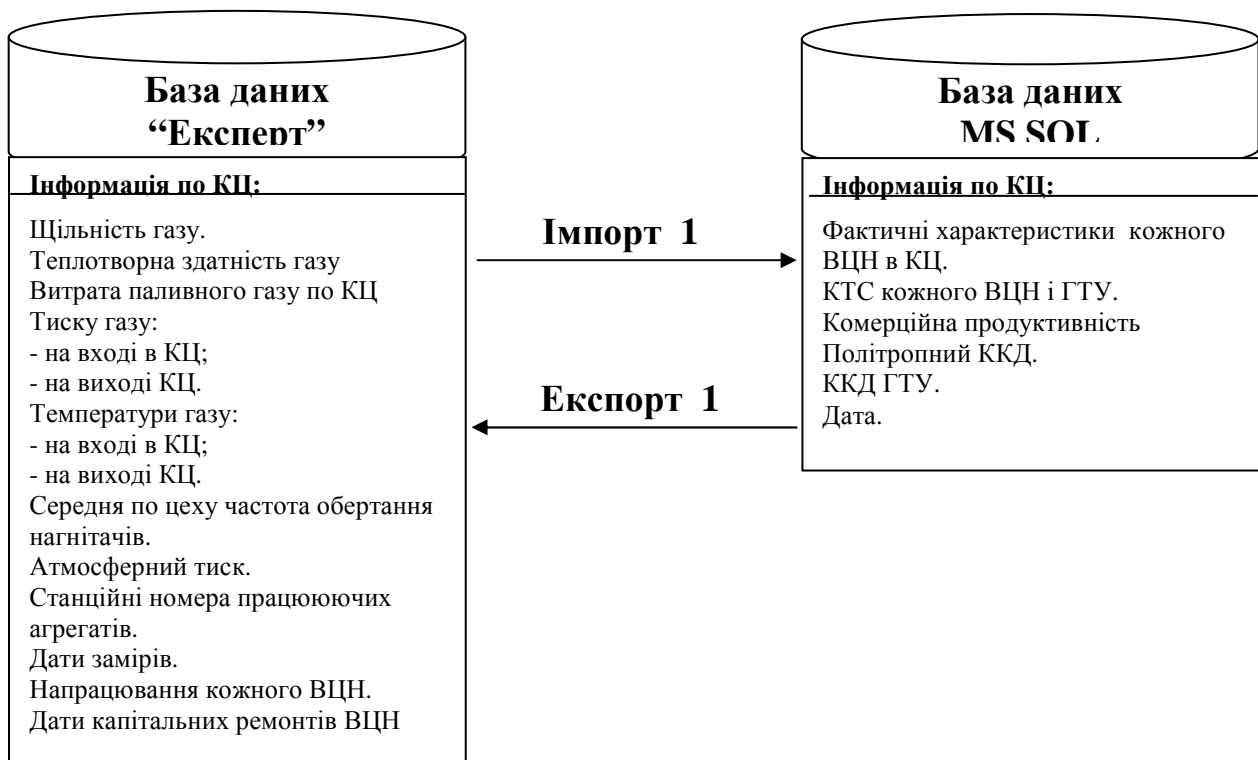


Рис. 5.23 – Інформаційний обмін між БД ПК "Експерт" і БД у середовищі

MS SQL

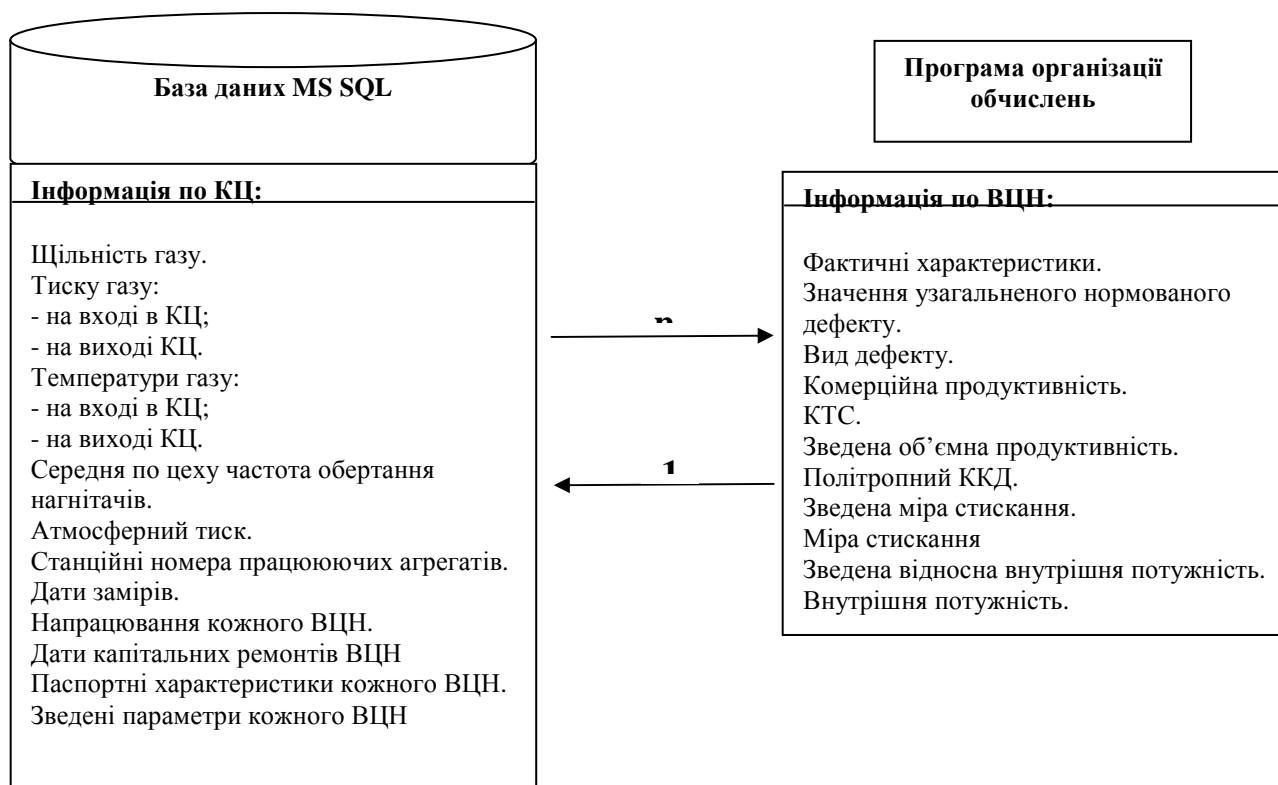


Рис. 5.24 - Інформаційний обмін програми організації обчислень з БД у середовищі MS SQL

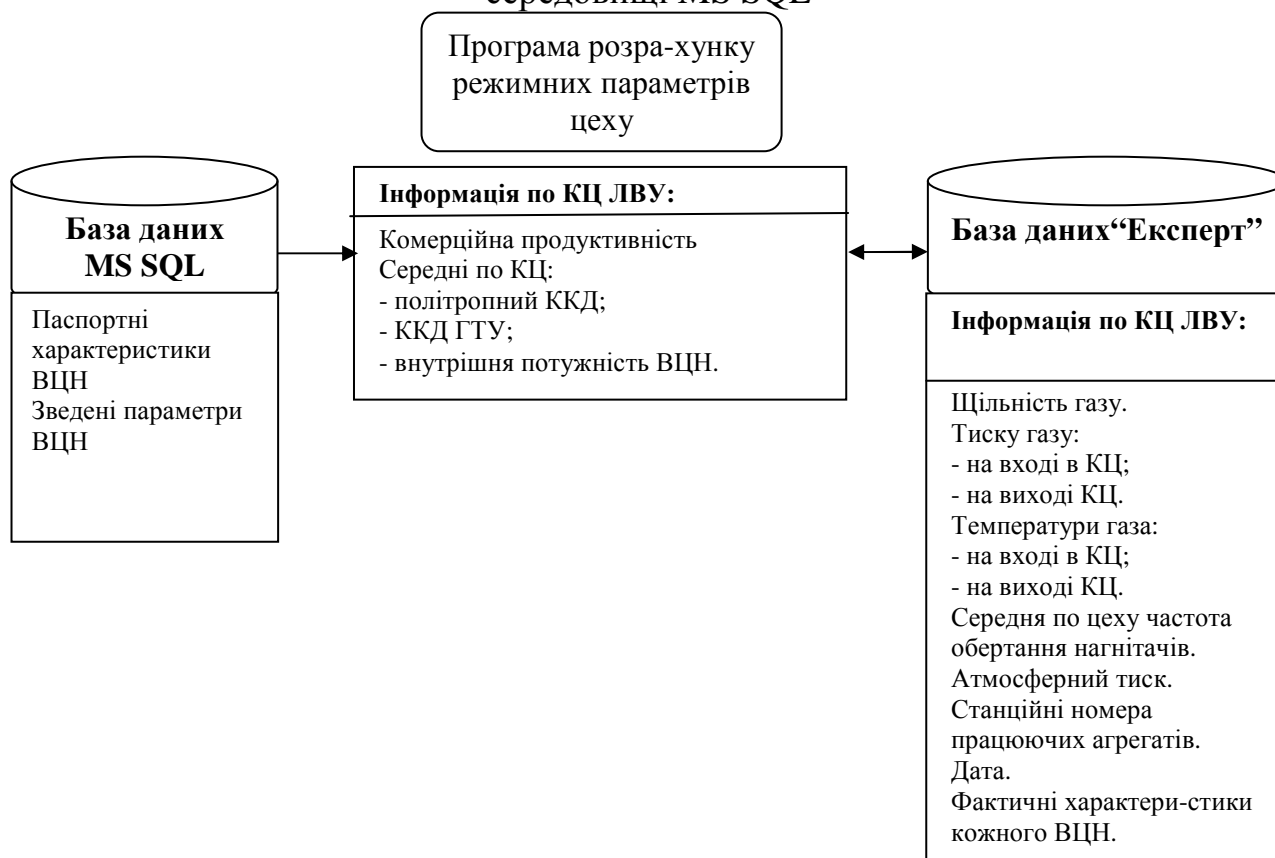


Рис. 5.25 - Інформаційний обмін програми розрахунку режимних параметрів КЦ з БД ПК "Експерт" і БД MS SQL

### Задачі верхнього рівня програмного комплексу

Для вирішення задач верхнього рівня програмним комплексом формується основна форма програми. Вид основної форми програми наведений на рис.5.26.

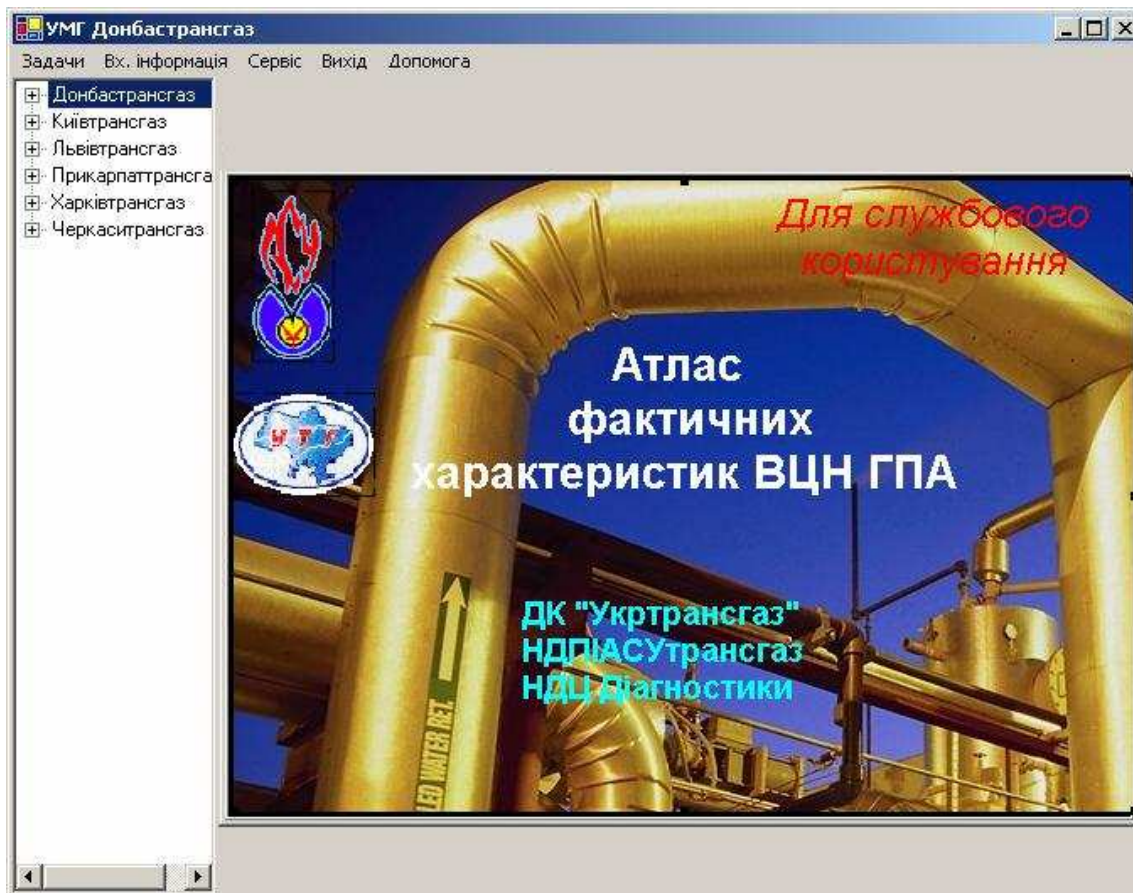


Рис. 5.26 – Основна форма програми

На основній формі подані:

- багаторівнева структура ДК "Укртрансгаз", що включає УМГ, КС, КЦ і ГПА;
- задачі оцінки ФТС ВЦН (меню "Задачі");
- вид вхідної інформації, на основі якої вирішується конкретна обрана задача (меню "Вх. інформація");
- налаштування обміну з базами даних, що містять необхідну вхідну інформацію й інформацію для запису результатів розрахунків (меню "Сервіс");
- налаштування дат розрахунку, вибір кількості відображуваних записів (меню "Сервіс");

- завершення роботи з програмним комплексом ( меню "Вихід");
- рекомендації з роботи за програмним комплексом (меню "Допомога").

Для вибору конкретної розв'язуваної задачі, виду вхідної інформації, задання настроювань необхідно увійти у відповідне меню.

Програмний комплекс при вході в меню "Задачі" формує наступні вікна, що відповідають сформульованим вище задачам:

- НДІ;
- Фактичні характеристики;
- Режимні параметри;
- База даних;
- Атлас.

Для обирання розв'язуваної задачі необхідно викликати відповідне меню.

При вході в меню "Вх. інформація" програмний комплекс формує вікна для задання одного з видів вхідної інформації.

Вхідною інформацією даного програмного комплексу є наступні дані:

- добові цехові дані програмного комплексу "Експерт" (вікно "Експерт");
- дані теплотехнічних вимірів окремих ВЦН (вікно "Тепл. іспити");
- агрегатні дані КС (вікно "Дані КС");
- дані користувача програмного комплексу (вікно "Дані користувача").

При виборі "Експерт" в меню "Сервіс"-"Настройки" необхідно ввести інформацію про початок і закінчення інтервалу часу, на якому визначають фактичні характеристики ВЦН.

При виборі "Тепл. іспити" або "Дані КС" необхідно указати файл, що містить відповідну вхідну інформацію.

При виборі "Дані користувача" вхідні дані задаються в процесі рішення задачі.

Програмний комплекс при вході в меню "Сервіс" формує наступні вікна:

- експорт інформації в програмний комплекс "Експерт";
- настроювання.



У вікні "Експорт інформації в програмний комплекс "Експерт" задається ознака запису розрахованих фактичних характеристик ВЦН ГПА і коефіцієнтів технічного стану ГПА до бази даних програмного комплексу "Експерт".

У вікні "Налаштування" визначається інформація, яку необхідно ввести для забезпечення обміну між програмними комплексами, опису шляхів доступу до баз даних, очищення тимчасових таблиць, вибору кількості записів для відображення режимних параметрів.

### **Задачі нижнього рівня програмного комплексу. Ведення і корекція нормативно-довідкової інформації**

Програмний комплекс реалізує наступні функції роботи з НДІ: перегляд, корекцію, введення НДІ за новим типом ВЦН, виключення НДІ знятого з експлуатації типу ВЦН. Для виконання цих функцій (за винятком перегляду) необхідне введення відповідного паролю. Крім того, корекція НДІ дозволена програмним комплексом тільки за окремими параметрами. У разі введення інформації, що виходить за межі заздалегідь заданого припустимого діапазону, програмний комплекс видає повідомлення про неприпустимість введення такої інформації.

Вікно "НДІ" містить наступну інформацію:

- номінальні, мінімальні і максимальні припустимі значення параметрів ВЦН, визначені технічною документацією;
- параметри зведення паспортних характеристик ВЦН;
- паспортні характеристики ВЦН (зведена міра стискання, політропний ККД, зведена внутрішня відносна потужність у функції від зведеної об'ємної продуктивності), що представляються у виді коефіцієнтів відповідних поліномів.

Вид вікна "НДІ" представлений на рис.5.27.

Нормативно-довідкова інформація по напітчам								
NOB	NOB_MIN	NOB_MAX	Z_PR	R_PR	T_PR	P_OUT_MAX	NAME	a
8200	5740	9020	0,91	52	288	35	НЦ-6.3/29	0
7980	5600	8400	0,91	50	288	70	280-11-1	1,44388
6150	4305	6765	0,925	51,7	288	70	НЦ-16-56-1.4	1,689
4800	3975	5565	0,92	50	288	70	370-18-1	1,39161
7980	5600	8400	0,91	50	288	70	280-11-7	1,413
5550	3780	5940	0,91	50	288	65	260-12-1	1,473
5300	3710	5830	0,91	50	288	65	370-14-1	1,41326
6150	4305	6458	0,91	50	288	65	Н-300-1,23	1,49792
6150	4305	6458	0,91	50	288	65	Н-6-56	1,557
8200	5740	8700	0,9	52	293	70	Н-196-1,45	1,436
8200	5740	8610	0,9	52	293	50	ГПА Ц-6,3-76	1,58796
8200	5500	8610	0,94	52	293	60	С-304	1,517
4800	3360	5280	0,91	50	293	70	520-12-1	1,38285
4800	3360	5280	0,888	52	288	80	Н-235-21-1	1,398
6200	4550	6820	0,9	50	288	120	RF-2BB-30/5	1,71923
6500	4550	6820	0,9	49	298	80	655P2 КЛАР	1,57822
6500	4580	6820	0,9	52	288	80	НЦ-16-75	1,214
5100	3570	5610	0,86	52	288	101	НЦ-16/100	1,10918
3700	2590	4070	0,88	52	288	80	Н-650-22-2ol	1,40295
4460	3122	4906	0,9	52	288	80	PCL-804-2	2,009

Рис. 5.27 – Вікно "НДІ"

### Визначення фактичних зведених характеристик ВЦН

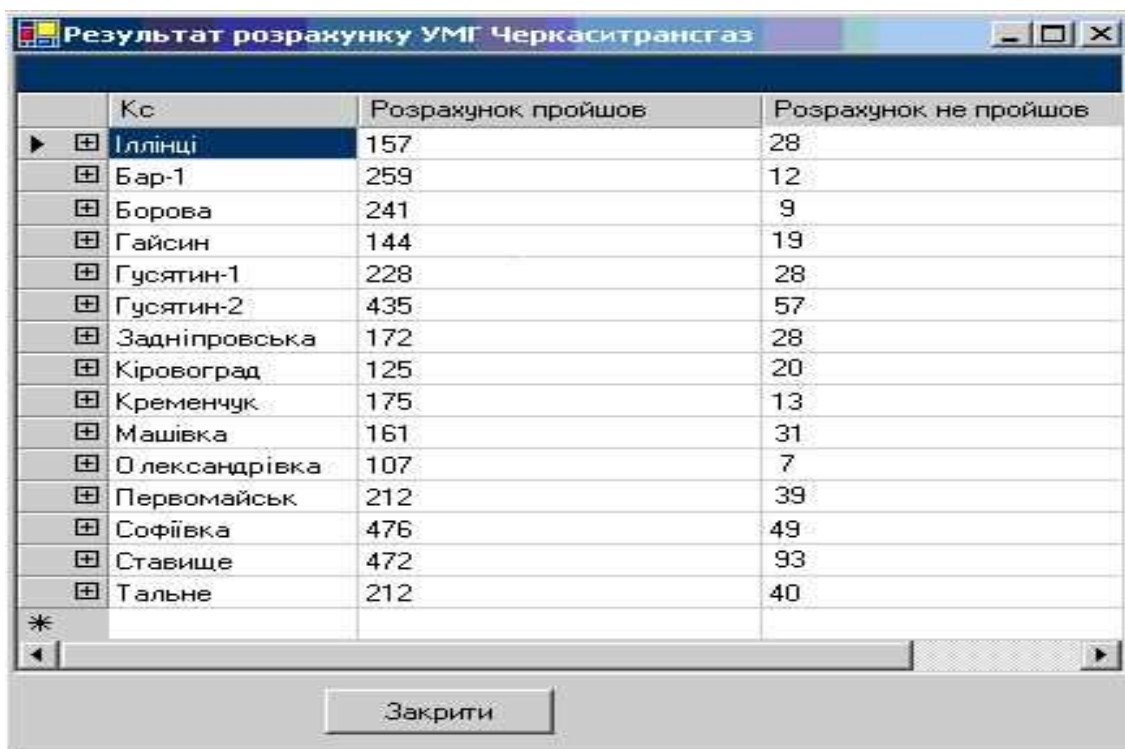
У процесі вирішення даної задачі реаловано три основних функції:

- контроль вхідної інформації на вірогідність;
- безпосередньо розрахунок фактичних характеристик ВЦН;
- контроль розрахованих фактичних характеристик ВЦН.

При розв'язанні задачі визначення фактичних зведених характеристик ВЦН виконуються наступні види контролю вхідної інформації:

- повноти змісту записів за всіма вхідними параметрами КЦ або ГПА;
- припустимих діапазонів зміни вхідних параметрів;
- припустимих діапазонів зміни наступних розрахункових параметрів: зведеної міри стиснення, політропного ККД, зведеної об'ємної продуктивності й узагальненого нормованого дефекту.

Підсумкові результати контролю на вірогідність вхідної інформації відображаються у вікні "Фактичні характеристики" у вигляді, що наведений на рис.5.28.



Кс	Розрахунок пройшов	Розрахунок не пройшов
Іллінці	157	28
Бар-1	259	12
Борова	241	9
Гайсин	144	19
Гусятин-1	228	28
Гусятин-2	435	57
Задніпровська	172	28
Кіровоград	125	20
Кременчук	175	13
Машівка	161	31
Олександрівка	107	7
Первомайськ	212	39
Софіївка	476	49
Ставище	472	93
Тальне	212	40

Рис. 5.28 – Підсумкові результати контролю вхідної інформації у вікні "Фактичні характеристики"

Для більш детального перегляду результатів контролю необхідно натиснути + ліворуч від обраної КС, де будуть показані наступні дані:

- загальна кількість даних, що надійшли на розрахунок;
- кількість даних за якими розрахунок не пройшов через наступні причини:
- неповні або неприпустимі значення вхідних даних;
- неприпустимі значення приведенного ступеня стиску;
- неприпустимі значення політропного ККД;
- неприпустимі значення узагальненого нормованого дефекту.

У процесі розрахунку фактичних характеристик ВЦН у вікні "Фактичні характеристики" відображаються поточні значення відсотка кількості КЦ, по яких розраховані фактичні характеристики і загальна кількість розрахунків.

Користувачеві програмного комплексу надається можливість проконтролювати розрахунок фактичних характеристик ВЦН, для чого йому необхідно виконати наступні операції:

- вибрати відповідні УМГ, КС, КЦ і номер ГПА;
- вибрати з відображуваних вхідних даних запис, за яким необхідно зробити розрахунок режимних параметрів ВЦН;
- натиснути кнопку "Розрахунок" у вікні "Фактичні характеристики".

У вікні "Фактичні характеристики" відображуються графіки паспортних і фактичних характеристик обраного ВЦН ГПА і вхідні дані, за якими проведений розрахунок (рис.5.29).

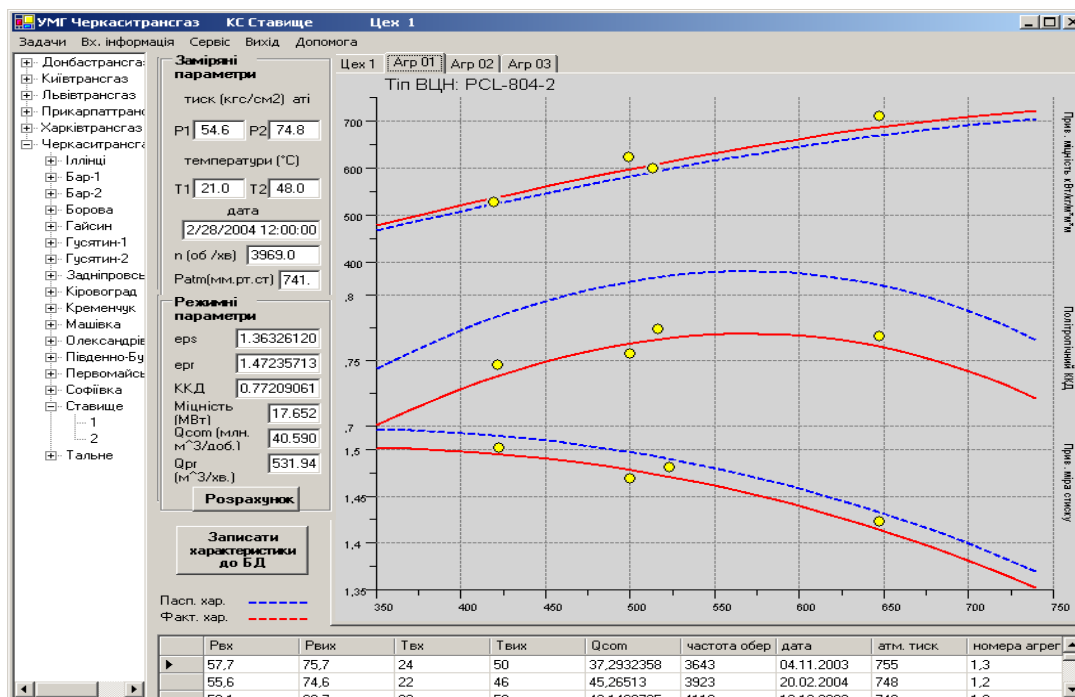


Рис. 5.29 – Вікно "Фактичні характеристики"

Після розрахунку режимних параметрів ВЦН програмний комплекс відображує значення цих параметрів у відповідних вікнах, а також графічно відображує точки режимних параметрів, що належать обраним записам вхідної інформації.

Контроль здійснюється через аналіз положення декількох точок режимних параметрів обраних записів щодо розрахованих характеристик. У випадку відсутності зауважень до розрахованих фактичних характеристик, за обраним ВЦН ГПА, користувач натискає кнопку "Записати характеристики до БД". Фактичні характеристики ВЦН у вигляді коефіцієнтів поліномів записуються у БД. У іншому випадку додатково аналізується НДІ, вхідна інформація.

## Визначення режимних параметрів роботи ВЦН

Дана задача реалізує наступні функції:

- визначення режимних параметрів роботи ВЦН за оперативними даними на основі фактичних зведених характеристик, що зберігаються в БД;
- дослідження впливу зміни параметрів ВЦН на його режимні параметри.

Для визначення режимних параметрів роботи ВЦН користувачеві необхідно у вікні "Режимні параметри":

- вибрати УМГ, КС, КЦ і номер ГПА;
- задати у відповідних вікнах параметри ВЦН.

У вікні відображуються паспортні і фактичні характеристики. Після натиснення кнопки "Розрахунок" проводиться розрахунок і результати розрахунку відображуються в числовому і графічному вигляді (рис.5.30).

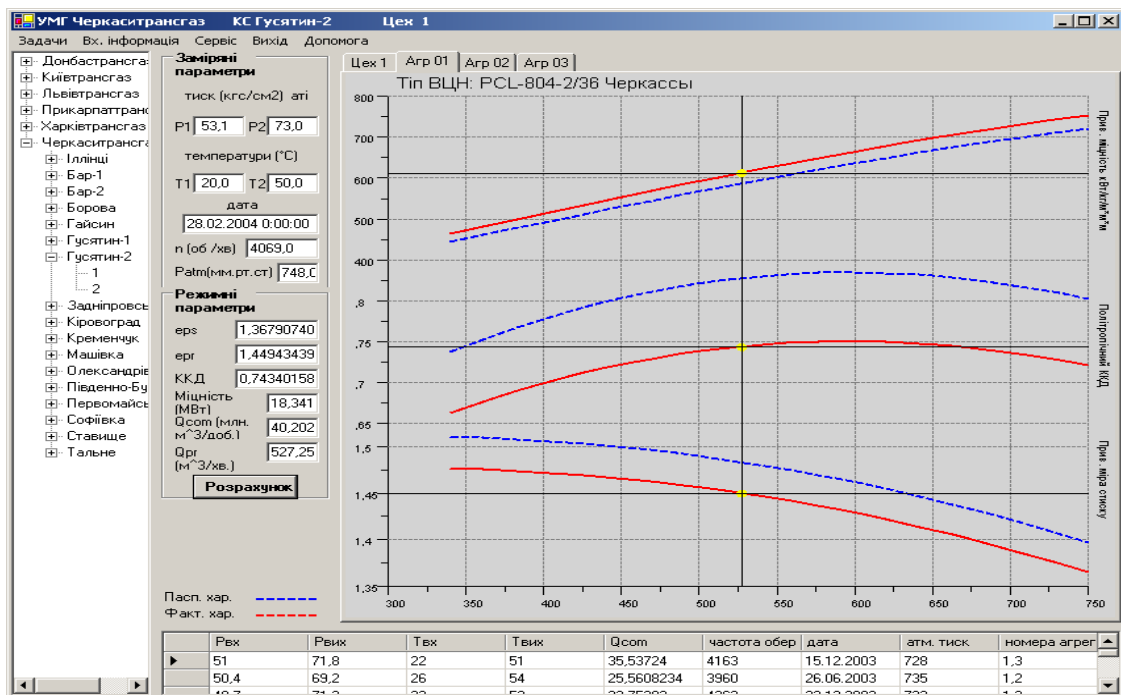


Рис. 5.30 – Вікно "Режимні параметри"

Для дослідження впливу зміни параметрів ВЦН на режимні параметри у вікнах завдання параметрів необхідно зробити відповідні зміни параметрів і натиснути кнопку "Розрахунок". Вплив зміни параметрів оцінюється за зміною точки режимних параметрів на графіках.

## Ведення статистичної бази даних фактичних зведених характеристик

При розв'язанні даної задачі реалізуються функції перегляду наступної інформації БД (рис.5.31):

- фактичних зведених характеристик ВЦН на моменти останнього і попереднього їхнього розрахунку;
- коефіцієнти технічного стану на всі моменти визначення фактичних характеристик ВЦН;
- фактичного наробітку і проведених ремонтів ВЦН від моменту останнього розрахунку і сумарного фактичного наробітку ВЦН.

Для одержання потрібної інформації необхідно вказати УМГ, КС, КЦ і номери ГПА і обрати відповідне меню.

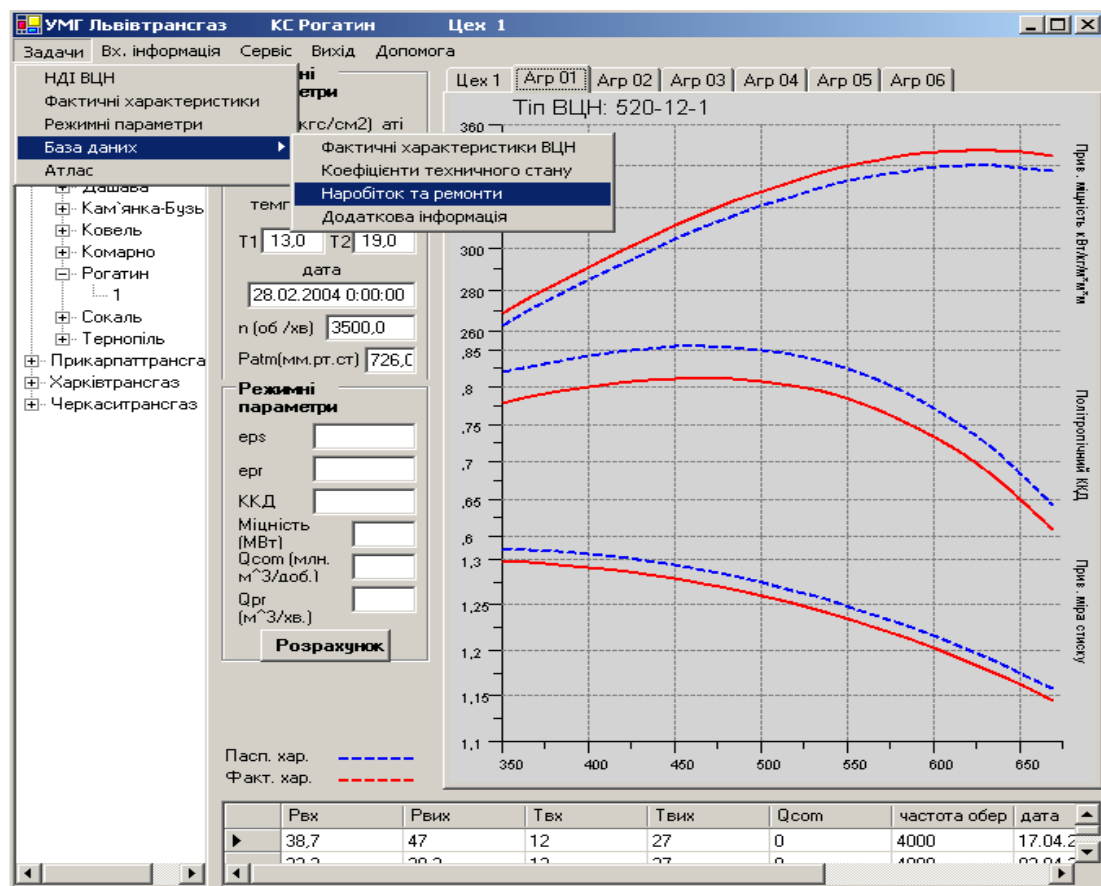


Рис. 5.31 – Вікно "База даних"

Програмний комплекс проводить статистичну обробку інформації і надає користувачеві можливість одержання необхідних даних за типами ВЦН для різних УМГ і КС, за типами ВЦН залежно від термінів наробітку, а також за зміною КТС у функції від термінів проведення ремонтів.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Альбом характеристик центробежных нагнетателей природного газа. – М.: ВНИИГАЗ, 1985. – 87 с.
2. Антонова Е.О. Мониторинг силовых агрегатов на компрессорных станциях / Е.О.Антонова, И.А. Иванов, О.А. Степанов, М.Н. Чекадровский; - СПб: Недра С.- Петерб. фил., 1998. – 216 с.
3. Ахмедзянов А.М. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам / А.М.Ахмедзянов, Н.Г.Дубравский, А.П.Тунаков; – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с.
4. Банди Б. Методы оптимизации / Б.Банди ;– М.: Радио и связь, 1988. – 128с.
5. Беккер М.В. Досвід розробки та впровадження альбому фактичних характеристик ВЦН ГПА / М.В.Беккер, Б.С. Ільченко, О.О. Прищепо, Б.І. Ізмалков // Нафтова і газова промисловість. - 2004. – № 2. – С. 45 – 46.
6. Беккер М.В. Метод визначення параметрів фактичного режиму та показників технічного стану ВЦН ГПА в умовах неповноти та невірогідності вхідної вхідної інформації / М.В. Беккер, Б.С.Ільченко, О.О. Прищепо, В.Г. Соляник, В.Л. Лівшиць, Б.І. Ізмалков // Нафтова і газова промисловість. - 2002. – № 3. – С. 41 – 47.
7. Биргер И.А. Техническая диагностика/Биргер И.А;– М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
8. Бруєв І.В. Використання альбомних характеристик при розрахунках показників ВЦН / І.В Бруєв, О.О. Прищепо, Б.С. Ільченко, В.Л. Лівшиць, Б.І.Ізмал-ков . // Нафтова і газова промисловість. - 2001. – № 1. – С. 55 – 58.
9. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач/ Ф. П. Васильев; - М.: Наука, 1988. – 698с.
10. Вукалович М.П. Техническая термодинамика. / М.П. Вукалович, И.Н. Новиков; – М.: Энергия, 1968. – 483 с.
11. Галлиулин З.Т. Интенсификация магистрального транспорта газа / З.П. Галлиулин, Е.В. Леонтьев; – М.: Недра, 1991. – 271с.
12. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке./ Н.Джонсон, Ф.Лион ; – М.: Мир, 1981. – 517с.



13. Доброхотов В.Д. Центробежные нагнетатели природного газа/ В.Д. Доброхотов; – М.: Недра, 1972. – 165 с.
14. Зарицкий С.П. Достоверность и эффективность диагностирования ГПА. / С.П. Зарицкий, В.Г. Семичасонов // Научно-тех. сборник. Сер. Диагностика оборудования и трубопроводов. - 2000. – № 4. – С. 3 – 6.
15. Дубравский Н.Г. Параметрические методы диагностического контроля состояния авиадвигателей. Линейные диагностические матрицы / Н.Г. Дубравский, М.Ф. Мокроус ., – М.: ЦИАМ, 1981. – Вып. 964. – 28 с.
16. Дэннис Дж. Численные методы безусловной оптимизации и решение нелинейных уравнений / Дэннис Дж.; – М.: Мир, 1988. – 474 с.
17. Жуковский М. И. Аэродинамический расчет потока в осевых турбомашинах/ М Жуковский.И.; – Л.: Машиностроение, 1967. – 287 с.
18. Зарицкий С. П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / Зарицкий С.П.; – М.: Недра, 1987. – 198 с.
19. Зарицкий С.П. Диагностирование оборудования КС: состояние и перспективы развития/ С.П.Зарицкий // Газовая промышленность. - 1991.– № 10. – С. 31 – 33.
20. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик; – Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 464 с.
21. Ильченко Б.С. Методология определения фактических характеристик ЦБН ГПА ДК “Укртрансгаз”/ Б.С. Ильченко // Інтегровані технології та енергозбереження. - 2003. – № 1. – С.15 – 20.
22. Ильченко Б.С. Определение фактических параметров и характеристик ГТУ в условиях эксплуатации/ Б.С. Ильченко // Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання: Зб. наук. пр. – Харків: Інститут проблем машинобудування ім. А.М.Подгорного НАН України. - 2003. – Т.1. – С. 326 – 332.
23. Ильченко Б.С. Определение фактического функционально-технического состояния центробежных нагнетателей газоперекачивающих агрегатов ДК “Укртрансгаз” по данным штатных измерений/ Б.С. Ильченко // Проблемы машиностроения. - 2003. – № 1. – С.58 – 64.
24. Ильченко Б.С. Повышение эффективности эксплуатации газоперекачивающего оборудования газотранспортной системы на основе диагностиро-

вания его функционально-технического состояния: диссертация д-ра техн. наук/ Б.С. Ильченко. – Х., 2004. – 360 с.

25. Ильченко Б.С. Решение режимно-технологических задач на основе диагностики функционально-технического состояния газоперекачивающего оборудования/ Б.С. Ильченко // Інтегровані технології та енергозбереження. - 2001. – № 4. – С. 92 – 104.
26. Ильченко Б.С. Учет функционального состояния газоперекачивающих агрегатов магистральных газопроводов при нормировании расхода топливного газа/ Б.С. Ильченко // Інтегровані технології та енергозбереження. - 2002. – № 4. – С. 104 – 106.
27. Ильченко Б.С. Системные принципы синтеза методов и моделей оценки фактического функционально-технического состояния эксплуатируемого парка ГПА магистрального газопровода Украины/ Б.С. Ильченко, Б.И. Измалков // Проблемы машиностроения. - 2004. – Том 7. – № 1. – С. 3 – 7.
28. Ильченко Б.С. Анализ и выбор оценок функционально-технического состояния газоперекачивающих агрегатов в системах автоматизированного управления компрессорного цеха / Б.С. Ильченко , Б.И. Измалков // Проблемы машиностроения. - 2004. – № 1. – С. 21 – 30.
29. Ильченко Б.С. Определение критерия эффективной загрузки газоперекачивающих агрегатов в компрессорном цехе магистрального газопровода / Б.С. Ильченко, А.В. Свечников, В.Б. Измалков // Вестник Национального технического университета "ХПИ". - 2003. – № 18. – С. 79 – 84.
30. Ильченко Б.С. Определение коэффициентов технического состояния ЦБН и ГТУ ГПА по данным штатных измерений / Б.С. Ильченко, Б.І. Измалков, О.В. Шатаєв // Вестник науки и техники. - 2004. – Вып. 2(17). – С. 10 – 17.
31. Визначення фактичних характеристик нагнітачів ГПА в умовах експлуатації методом імітаційного моделювання/ Б.С. Ильченко, О.О. Прищепо, О.Л. Тумаркін, Б.І. Измалков // Нафтова і газова промисловість, 1999. – № 6. – С. 44 – 47.
32. Ильченко Б.С. Визначення фактичного технічного стану ГТУ і прогнозування його зміни в процесі експлуатації за даними штатних вимірів /

- Б.С. Ильченко, М.В.Токаев // Східно-європейський журнал передових технологій. - 2004. – № 2. – С. 11 – 14.
33. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей/ И.В. Кеба; – М.: Транспорт, 1980. – 246 с.
34. Кириллов И.И. Теория турбомашин/ И.И.Кириллов; – Л.: Машиностроение, 1972. – 535 с.
35. Ковалко М.П. Методи та засоби підвищення ефективності функціонування систем трубопровідного транспорту газу/ М.П. Ковалко; – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2001. – 287 с.
36. Комаров А. П. Исследование плоских компрессорных решеток. / А.П. Комаров; кн. Лопаточные машины и струйные аппараты; – М., "Машиностроение". - 1967. – С. 67 – 110.
37. Комплексна державна програма енергозбереження України. – К.: Держкоменергозбереження України. - 1996. – 234 с.
38. Копелев С.З. Расчет турбин авиационных двигателей/ С.З. Копелев, Н.Д. Тихонов; – М.: Машиностроение, 1974. – 256 с.
39. Медведев В.А. О вероятной оценке состояния газо-воздушного тракта по термогазодинамическим параметрам/ В.А. Медведев , А.М. Ахмедзянов // Испытания авиационных двигателей: Межвуз. научный сборник. – Уфа: УАИ, 1988. – Вып.16. – С. 29 – 35.
40. Метод диагностирования технического состояния нагнетателя. / В.П. Парафейник, А.М. Хорошенко, С.К. Королев, В.М. Минько // Газовая промышленность. - 1985. – № 8. – С. 22 – 25.
41. Методические указания по проведению теплотехнических и газодинамических расчетов при испытаниях газотурбинных газоперекачивающих агрегатов. – Москва: ВНИИГАЗ, 1999. – 51 с.
42. Микаэлян Э.А. Эксплуатация газотурбинных газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций на газопроводах/ Э.А. Микаэлян ;– М.: Недра, 1994. – 304 с.
43. Панкратов В.С. Разработка и эксплуатация АСУ газотранспортными подсистемами / В.С. Панкратов, Р.Я. Берман; – Л.: Недра, 1982. – 358 с.
44. Поршаков Б.П. Разработка методов параметрической диагностики газоперекачивающих агрегатов и взаимодействия магистральных

- газопроводов с окружающей средой/ Б.П. Поршаков; Отчет МИНХ и ГП по теме № 48/30 – 84. – М., 1987. – 154 с.
45. Повышение эффективности эксплуатации энергопривода компрессорных станций/ Б.П. Поршаков, А.С. Лопатин, А.М. Назарьина, А.С. Рябченко; – М.: Энергия, 1992. – 324 с.
  46. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины / В.Ф. Рис; – Л.: Машиностроение, 1981. – 367 с.
  47. Експлуатаційникові газонафтового комплексу / В.В. Розгонюк, Л.А. Хачікян, М.А. Григіль, О.С. Удалов, В.П. Нікішин; довідник. – К.: Росток, 1998. – 432с.
  48. Селезнев В.Е. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, Г.С. Клишин; – М.:УРСС.- 2002. – 448 с.
  49. Селезнев К.П. Теория и расчет турбокомпрессоров / К.П. Селезнев, Ю.С. Подобуев, С.А. Анисимов; – Л.: Машиностроение, 1968. – 406 с.
  50. Сухарев М.Г. Оптимизация систем транспорта газа/ М.Г. Сухарев, Е.Р. Ставорский; – М.: Недра, 1975. – 253 с.
  51. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок/ В.М. Дорофеев, В.Г. Маслов и др.; – М.: Машиностроение, 1973. – 143 с.
  52. Методы, средства и опыт диагностики авиационных газотурбинных двигателей для наземных энергетических установок на базе ГТД./ О.Н. Фаворский, И.В. Егоров, В.А. Степанов, Карасев В.А. // 1-ая международная конференция "Энергодиагностика". – Москва, 1995. – Т.1. – С.62 – 77.
  53. Хорлок Дж.Х. Осевые турбины (газовая динамика и термодинамика). (Пер. с англ.). – М.: Машиностроение, 1972. – 212 с.
  54. Основные направления развития топливно-энергетического комплекса Украины / А.К. Шидловский, А.С. Григорьев, Б.З. Пириашвили, М.И. Минц // Техн. Электродинамика. - 1992. – № 6. – С. 3 – 11.
  55. Щуровский В.А. Инструкция по контролю и учету технического состояния элементов газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / В.А. Щуровский, С.П. Зарицкий. - – М: ВНИИГАЗ, 1977. – 32 с.

56. Ziegler Kai U. A study on impeller-diffuser interaction. Pt.1. Influence on the performance. / Ziegler Kai U., Gallus Heinz F., Niehuis Reinhard; Trans. ASME. J. Turbomach, 2003. – 125. – № 1. P. 173 – 182.
57. Ziegler Kai U. A study on impeller-diffuser interaction. Pt.2. Detailed flow analysis. / Ziegler Kai U., Gallus Heinz F., Niehuis Reinhard; Trans. ASME. J. Turbomach, 2003. – 125. – № 1. – P. 183 – 192.
58. Do we know the attainable efficiency of centrifugal pumps better? World pumps, 2002. – № 424. – P. 24 – 29.
59. Shum V.K.P. Impeller-diffuser interaction in centrifugal compressor. / Shum V.K.P., Tan C.S., Cumpsty N.A. (Gas Turbine Laboratory Massachusetts Institute of Technology. Cambridge MA02139) Trans. ASME. J. Turbomach, 2000. – 122. – № 4. – P. 777 – 786.
60. International Standard ISO 5389: edition 1992-05-15. Turbo compressor – Performance test code. – 172 p.
61. Mathioudakis K. Uncertainty reduction in gas turbine performance diagnostics by accounting for humidity effects. / Mathioudakis K., Tsalavoutas T. Trans. ASME. J. Eng. // Gas Turbines and Power, 2002. – 124. – № 4. – P. 801 – 808.

**ДОДАТОК. Таблиці скоректованих паспортних характеристик та значення коефіцієнтів апроксимуючих поліномів паспортних характеристик для різних типів ВЦН, що експлуатують на КС ДК "Укртрансгаз"**

Таблиця 1

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
НЦ-16С/76-1,44		255	550	5200		0,9	51,6		288	
Витратно-напорна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3, (м^3/хв)^{-1}$	$C \cdot 10^6, (м^3/хв)^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1}, кВт \cdot м^3/кг$	$B1 \cdot 10, кВт \cdot м^3/кг \cdot (м^3/хв)^{-1}$	$B2 \cdot 10^3, (кВт \cdot м^3/кг) \cdot (м^3/хв)^{-2}$	$B3 \cdot 10^6, (кВт \cdot м^3/кг) \cdot (м^3/хв)^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3, (м^3/хв)^{-1}$	$D2 \cdot 10^6, (м^3/хв)^{-2}$	$D3 \cdot 10^9, (м^3/хв)^{-3}$
1,34846	5,7321	-11,0675	11,9466	5,20481	1,80128	-3,43476	-1,44396	-8,18279	28,8848	-30,797

Таблиця 2

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
280-11-1		130	300		7980		0,91	50		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності					Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3, (м^3/хв)^{-1}$	$C \cdot 10^6, (м^3/хв)^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1}, кВт \cdot м^3/кг$	$B1 \cdot 10, кВт \cdot м^3/кг \cdot (м^3/хв)^{-1}$	$B2 \cdot 10^3, (кВт \cdot м^3/кг) \cdot (м^3/хв)^{-2}$	$B3 \cdot 10^6, (кВт \cdot м^3/кг) \cdot (м^3/хв)^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3, (м^3/хв)^{-1}$	$D2 \cdot 10^6, (м^3/хв)^{-2}$	$D3 \cdot 10^9, (м^3/хв)^{-3}$	
1,44388	3,89895	-16,015	5,974	1,275	2,27	-6,836	0,86801	-5,41063	51,86146	-128,166	

Таблиця 3

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність		К стиснення оефіцієнт		Газова стала		Зведена температура	
НЦ-16-56-1.44		480	999		6150		0,92		50		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності					Характеристика політропного ККД				
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$		
1,689	0,2772	-0,4866	-18,24	17,72	-1,5289	0,433	1,02577	-1,44662	2,64747	-1,351		

Таблиця 4

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала	Зведена температура		
370-18-1		317	690	4800		0,92	50	288		
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,34614	1,18578	-1,7962	1976563	-5,59494	2,29787	-1,87474	-0,10146	5,09794	-8,45226	4,106

Таблиця 5

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
260-12-1		317	690		4800		0,92	50		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності					Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3, (м^3/хв)^{-1}$	$C \cdot 10^6, (м^3/хв)^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1}, кВт \cdot м^3/кг$	$B1 \cdot 10, кВт \cdot м^3/кг \cdot (м^3/хв)^{-1}$	$B2 \cdot 10^3, (кВт \cdot м^3/кг) \cdot (м^3/хв)^{-2}$	$B3 \cdot 10^6, (кВт \cdot м^3/кг) \cdot (м^3/хв)^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3, (м^3/хв)^{-1}$	$D2 \cdot 10^6, (м^3/хв)^{-2}$	$D3 \cdot 10^9, (м^3/хв)^{-3}$	
1,34614	1,18578	-1,7962	19,76563	-5,59494	2,29787	-1,87474	-0,10146	5,09794	-8,45226	4,106	

Таблиця 6

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала	Зведена температура		
370-14-1		270	550	5500		0,9	50	288		
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,393	2,113	-4,699	-1,76	10,27	-1,305	0,424	1,39104	-6,57168	24,46497	-29,047



Таблиця 7

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
Н-300-1,23		190	500	6150		0,91	50		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,5173	1,80045	-5,0929	8,10986	-0,95353	2,92377	-4,88137	1,04248	-3,37835	15,733	-22,35

Таблиця 8

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
Н-6-56		198	500		6150		0,91	50		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності					Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	
1,557	0,9077	-3,081	0,00477	8,626	-0,8683	-0,3022	0,85736	-1,90461	10,79377	-15,475	

Таблиця 9

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність	Коефіцієнт стиснення	Газова стала	Зведена температура			
Н-196-1,45		140	280	8200	0,9	52	293			
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,34846	1,436	4,184	11,9466	-16,8	1,346	11,79	-2,651	0,666	68,5396	-152,716

Таблиця 10

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність	Коефіцієнт стиснення	Газова стала	Зведена температура		
ГПА-Ц-6,3-76/1		105	225		8200	0,9	52	293		
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot$ $\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
0,96586	20,7787	-84,636	9,35047	-0,72674	7,51992	-26,8708	1,18879-	16,499	164,8302	-463,282

Таблиця 11

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
Ц-6,3-76/1,45		105	255		8200		0,9	52		293	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності					Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	
0,96856	20,7787	-84,636	9,35047	-0,7264	7,5199	-26,8708	1,1887	-16,4997	164,8302	-463,282	

Таблиця 12

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність	Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
520-12-1(3)		350	670		4800	0,91	50		293	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,38285	2,8398	-3,208	2,72664	8,12351	-0,33098	-2,48942	-0,33098	-1,94638	7,7689	-8,007

Таблиця 13

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
Н-235-21-1		180	320	4800		0,888	52		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3, (m^3/xv)^{-1}$	$C \cdot 10^6, (m^3/xv)^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1}, кВт \cdot m^3/кг$	$B1 \cdot 10, кВт \cdot m^3/кг \cdot (m^3/xv)^{-1}$	$B2 \cdot 10^3, (кВт \cdot m^3/кг) \cdot (m^3/xv)^{-2}$	$B3 \cdot 10^6, (кВт \cdot m^3/кг) \cdot (m^3/xv)^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3, (m^3/xv)^{-1}$	$D2 \cdot 10^6, (m^3/xv)^{-2}$	$D3 \cdot 10^9, (m^3/xv)^{-3}$
1,398	10,5838	-32,7063	4,43157	16,17366	-0,21687	-7,06165	1,1048	-6,84045	46,2663	-93,416

Таблиця 14

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення		Газова стала		Зведена температура	
RF-2BB-30 56		215	3550		6200		0,9		50		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності					Характеристика політропного ККД				
A	$B \cdot 10^3, (m^3/xv)^{-1}$	$C \cdot 10^6, (m^3/xv)^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1}, кВт \cdot m^3/кг$	$B1 \cdot 10, кВт \cdot m^3/кг \cdot (m^3/xv)^{-1}$	$B2 \cdot 10^3, (кВт \cdot m^3/кг) \cdot (m^3/xv)^{-2}$	$B3 \cdot 10^6, (кВт \cdot m^3/кг) \cdot (m^3/xv)^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3, (m^3/xv)^{-1}$	$D2 \cdot 10^6, (m^3/xv)^{-2}$	$D3 \cdot 10^9, (m^3/xv)^{-3}$		
1,17923	11,05572	-29,0188	46,9745	-34,7065	19,1138	-28,3573	0,17877	4,4581	-7,54917	-1,872		

Таблиця 15

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала	Зведена температура		
655P2 КЛАРК		150	300	6500		0,9	49	298		
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,57822	12,05062	-40,4739	56,71355	-69,647	41,68214	-75,3309	-0,32993	13,7485	-52,0082	60,8375

Таблиця 16

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
НЦ-16-75		320	530	6500		0,9	52		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,214	2,335	-4,226	4,435	3,315	0,6761	-1,285	0,98992	-2,68529	12,26055	-15,926

Таблиця 17

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність	Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
НЦ-16/100		250	440		5100	0,86	52		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B_0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B_1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot$ $\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B_2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B_3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}]$	D0	$D_1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D_2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D_3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,10918	8,18371	-16,6073	72,31233	-53,2136	19,90837	-23,0241	-0,14968	5,54172	-6,73281	-3,25

Таблиця 18

Тип ВЦН			Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність	Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
Н-650-21-2			380	820	3700	0,88	52		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B_0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B_1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B_2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B_3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D_1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D_2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D_3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,57798	2,278091	-3,5358	26,9611	-2,38957	2,32468	-1,56057	0,92511	-1,56057	4,8357	-4,267

Таблиця 19

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура
H-650-22-2		450	820		3700		0,88	52		288
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності					Характеристика політропного ККД		
A	$B \cdot 10^3, (m^3/xv)^{-1}$	$C \cdot 10^6, (m^3/xv)^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1}, кВт \cdot m^3/кг$	$B1 \cdot 10, кВт \cdot m^3/кг \cdot (m^3/xv)^{-1}$	$B2 \cdot 10^3, (кВт \cdot m^3/кг) \cdot (m^3/xv)^{-2}$	$B3 \cdot 10^6, (кВт \cdot m^3/кг) \cdot (m^3/xv)^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3, (m^3/xv)^{-1}$	$D2 \cdot 10^6, (m^3/xv)^{-2}$	$D3 \cdot 10^9, (m^3/xv)^{-3}$
1,49362	3,67597	-4,1071	28,05	1,335	1,548	-1,17	0,3402	1,22456	0,10244	-1,367

Таблиця 20

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність	Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
PCL-804-2		350	740		4460	0,9	52		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3, (m^3/xv)^{-1}$	$C \cdot 10^6, (m^3/xv)^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1}, кВт \cdot m^3/кг$	$B1 \cdot 10, кВт \cdot m^3/кг \cdot (m^3/xv)^{-1}$	$B2 \cdot 10^3, (кВт \cdot m^3/кг) \cdot (m^3/xv)^{-2}$	$B3 \cdot 10^6, (кВт \cdot m^3/кг) \cdot (m^3/xv)^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3, (m^3/xv)^{-1}$	$D2 \cdot 10^6, (m^3/xv)^{-2}$	$D3 \cdot 10^9, (m^3/xv)^{-3}$
2,009	1,808	-2,689	17,41292	7,44016	0,52086	-0,75902	0,39506	1,25957	-0,51341	-0,693

Таблиця 21

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
НЦ-6,3-125/2.2		36	64	8200		0,91	52		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B_0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B_1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot$ $\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B_2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B_3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}]$	D0	$D_1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D_2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D_3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
2,5455	265,681	-3783,34	-0,04699	35,6066	16,062	-505,986	1,24984	-41,035	1075,158	-8857,89

Таблиця 22

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
280-12-7		140	320		7980		0,91	50		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності					Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B_0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B_1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B_2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B_3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot$ $\cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}]$	D0	$D_1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D_2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D_3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	
1,42	4,31	-17	14,65892	-11,6997	8,49506	-16,4315	1,63355	-16,5038	105,221	-221,056	



Таблиця 23

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
280-11-6		150	300		8000		0,91	50		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності					Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	
1,31323	5,3307	-19,2521	4,45227	2,39374	2,46171	-8,43452	1,56854	-14,8789	93,01304	-184,519	

Таблиця 24

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
RF-2BB-30/76 COOPER BESSEME		160	300	6500		0,9	50		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,43696	11,73818	-37,1304	3,96452	18,60253	-6,03436	7,7583	0,86613	-7,30951	62,08796	-135,334

Таблиця 25

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
ГПА Ц6,3С/41-1,7		125	275	8200		0,953	52		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
2,03035	22,02302	-83,7334	52,72749	-69,4482	52,11034	-106,444	1,57755	-16,6709	108,6582	-225,987

Таблиця 26

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
Н-16-76-1,44		310	570	6500		0,9	52		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,09324	5,81247	-7,2,42312	2,42322	3,84197	3,64973	-5,06809	0,79686	-0,45753	2,22871	-2,521

Таблиця 27

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
НЦ-6,3/56-1.45		130	265	8200		0,9	52		293	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,11987	18,25188	-67,0244	2,244373	14,4018	-0,37034	-11,1175	2,85331	-41,5743	266,7562	-545,623

Таблиця 28

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
НЦ1-16С/76-1.44		255	850	5200		0,9	51,6		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,20504	7,00098	-11,9161	11,9466	5,20481	1,80128	-3,43476	1,44396	-8,18279	28,8828	-30,797

Таблиця 29

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача		Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
ГПА Ц6,3/41-1,45		200	355		8200		0,94	52		295	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності					Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	
1,0955	10,57493	-26,63257	-1,36321	23,63257	-5,1506	2,38858	2,9898	-31,8121	142,8993	-203,858	

Таблиця 30

Тип ВЦН		Мін. обороти нагнітача	Макс. обороти нагнітача	Номінальна потужність		Коефіцієнт стиснення	Газова стала		Зведена температура	
PLC-804-2/36 Черкасы		340	750	4460		0,9	52		288	
Витратно-напірна характеристика			Характеристика зведеної відносної внутрішньої потужності				Характеристика політропного ККД			
A	$B \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$C \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B0 \cdot 10^{-1},$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}$	$B1 \cdot 10,$ $\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг} \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$B2 \cdot 10^3,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$B3 \cdot 10^6,$ $(\text{кВт} \cdot \text{м}^3/\text{кг}) \cdot (\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$	D0	$D1 \cdot 10^3,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-1}$	$D2 \cdot 10^6,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-2}$	$D3 \cdot 10^9,$ $(\text{м}^3/\text{хв})^{-3}$
1,9997	1,46525	-2,0521	20,26978	5,63471	0,64414	0,63631	0,28003	1,9316	-1,80503	0,209

**НАУКОВЕ ВИДАННЯ**

**Ільченко Борис Самуїлович**

**ДІАГНОСТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-  
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ  
АГРЕГАТІВ**

**МОНОГРАФІЯ**

Відповідальний за випуск *І. І. Капцов*

Редактор *М. З. Аляб'єв*

Комп'ютерне верстання *Н. В. Зражевська*

Підп. до друку 7.04.10  
Друк на ризографі.  
Зам. №

Формат 60x84 /16  
Ум. друк. арк. 4,8  
Тираж 500 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківська національна академія міського господарства,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002

Електронна адреса: [rectorat@ksame.kharkov.ua](mailto:rectorat@ksame.kharkov.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи: ДК №4064 від 12.05.2011